



Ecoulement 3D dans une structure d'échangeur Confrontation Mesures Simulations

F. Launay, T. Faure, F. Lusseyran, P. Gougat

► To cite this version:

F. Launay, T. Faure, F. Lusseyran, P. Gougat. Ecoulement 3D dans une structure d'échangeur
Confrontation Mesures Simulations. 2004. in2p3-00023371

HAL Id: in2p3-00023371

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00023371>

Submitted on 1 Dec 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IPNO 04-02

**Ecoulement 3D dans une structure
d'échangeur.
Confrontation Mesures Simulations.**

François Launay*
Thierry Faure, François Lusseyran**,
Pierre Gougat ****

Ecoulement 3D dans une structure d'échangeur thermique. Confrontation Mesures Simulations.

François LAUNAY*, Thierry FAURE**, François LUSSEYRAN**, Pierre GOUGAT**

Juin 2004

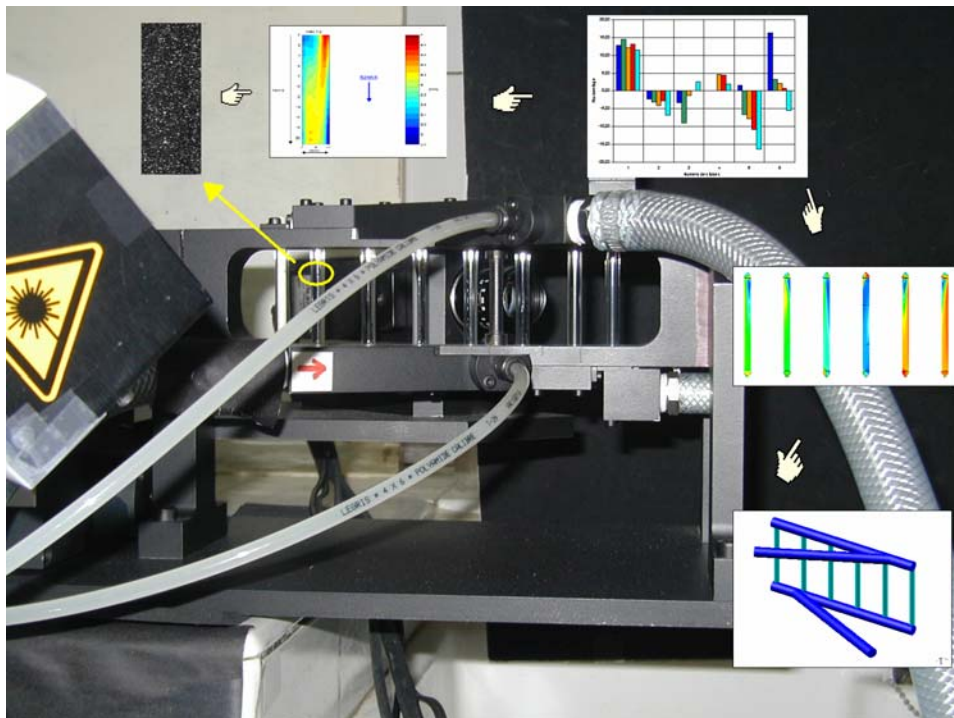


Fig. 1 Vélométrie par PIV sur une maquette et comparaison à un modèle numérique.

* Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, *Unité Mixte de Recherche 8608, Centre National de la Recherche Scientifique, 15 rue Georges Clémenceau, 91406 Orsay Cedex, France.* (launayf@ipno.in2p3.fr)

** Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, *Unité Propre de Recherche 3251, Centre National de la Recherche Scientifique, B.P. 133, 91403 Orsay Cedex, France* (thierry.faure@limsi.fr, lussey@limsi.fr, gougat@limsi.fr)

Sommaire.

1.	Introduction.....	- 4 -
2.	Etudes expérimentales.	- 5 -
2.1.	Généralités.	- 5 -
2.2.	Expérience avec une prémaquette.	- 6 -
2.3.	Expérience avec la maquette finale.	- 10 -
2.3.1.	Description de la maquette.	- 10 -
2.3.2.	Dispositif expérimental (Fig. 12).....	- 11 -
2.3.3.	Mesures de pression.	- 12 -
2.3.4.	Mesures sur le tube isolé.	- 13 -
2.3.5.	Mesures sur le réseau de six tubes.	- 14 -
2.4.	Commentaires.....	- 17 -
3.	Simulations numériques.....	- 18 -
3.1.	Généralités.	- 18 -
3.2.	Modélisation.....	- 18 -
3.3.	Calculs.....	- 20 -
3.3.1.	Cas n°1 :.....	- 20 -
3.3.2.	Cas n°2 :.....	- 24 -
3.3.3.	Cas n°3 :.....	- 25 -
3.4.	Profils de vitesse dans les tubes.	- 27 -
3.5.	Commentaires.....	- 30 -
4.	Conclusions.	- 31 -
5.	Remerciements.....	31
6.	Références.	- 32 -

1. Introduction.

Cette étude se situe, à l'origine, dans le contexte du projet d'accélérateur fort courant IPHI (Injecteur de Protons Haute Intensité), et s'étend plus généralement aux problèmes de comportement thermomécanique des structures, soumises à des flux de puissance élevés. Des outils de simulation permettent d'apprécier et d'optimiser ces problèmes, rencontrés lors la phase de conception.

Les performances requises dans les cahiers des charges nécessitent une bonne maîtrise des codes de calculs utilisés pour la simulation et, pour certaines études complexes une confrontation à des mesures afin d'évaluer le périmètre de validité des résultats.

Ces considérations ont débouchées sur une collaboration entre l'I.P.N. d'Orsay* et le L.I.M.S.I.**.

Cette collaboration porte sur la mesure de vitesse d'écoulement d'eau dans une maquette à l'échelle 1 d'un échangeur thermique. Les résultats de mesures seront comparés aux résultats de simulations.

Ce rapport présente une synthèse du travail effectué dans le cadre de cette collaboration.

2. Etudes expérimentales.

2.1. Généralités.

L'objectif de ces études est de déterminer les champs de vitesse d'un écoulement d'eau, dans un réseau de six tubes inclus dans une géométrie complexe d'échangeur de chaleur. La configuration des canaux de refroidissement de l'échangeur présente une géométrie en 3 dimensions : les circuits d'entrée et de sortie ne sont pas dans le même plan que les canaux à explorer (Fig. 2). Les dimensions réduites des tubes, 4 mm de diamètre hydraulique sur environ 40 mm de long, nécessitent une méthode de mesure non intrusive, afin de ne pas perturber l'écoulement, et adaptée à un régime turbulent. La vélocimétrie par images de particules (PIV) doit pouvoir répondre à ces contraintes.

Nous présentons ici les différentes étapes qui ont permis de mener à bien ces études :

- réalisation d'un banc hydraulique et d'une prémaquette, adaptation de la méthode de mesure par PIV à cette prémaquette.
- réalisation d'une maquette complète à l'échelle 1.
- mise en œuvre de cette maquette.

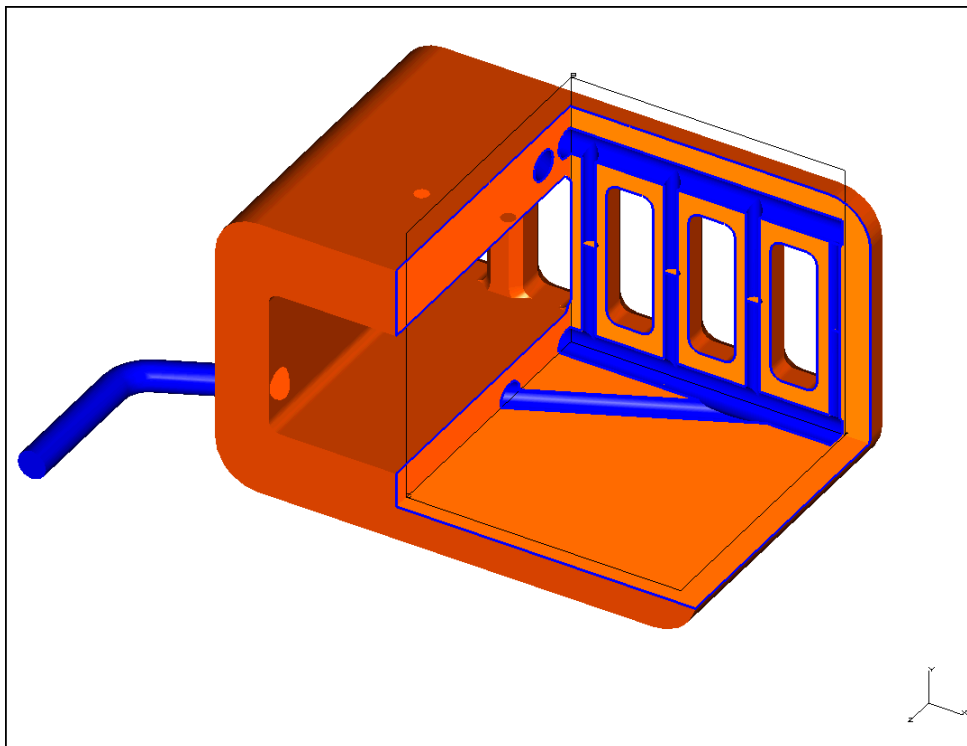


Fig. 2 Vue en coupe des canaux dans un échangeur.

2.2. Expérience avec une prémaquette.

Afin de valider le principe de mesure par PIV dans la configuration décrite ci-dessus nous avons réalisé des essais sur une prémaquette. L'ensemble de ces essais a fait l'objet d'un rapport détaillé [1] dont nous rapportons ici les principales étapes.

Le principe de la PIV consiste à identifier le déplacement de particules dans un écoulement, sur deux images successives séparées par un intervalle de temps très court (Fig. 3). Cette méthode donne accès aux composantes bidimensionnelles d'un champ de vitesses instantanées dans une section plane de l'écoulement.

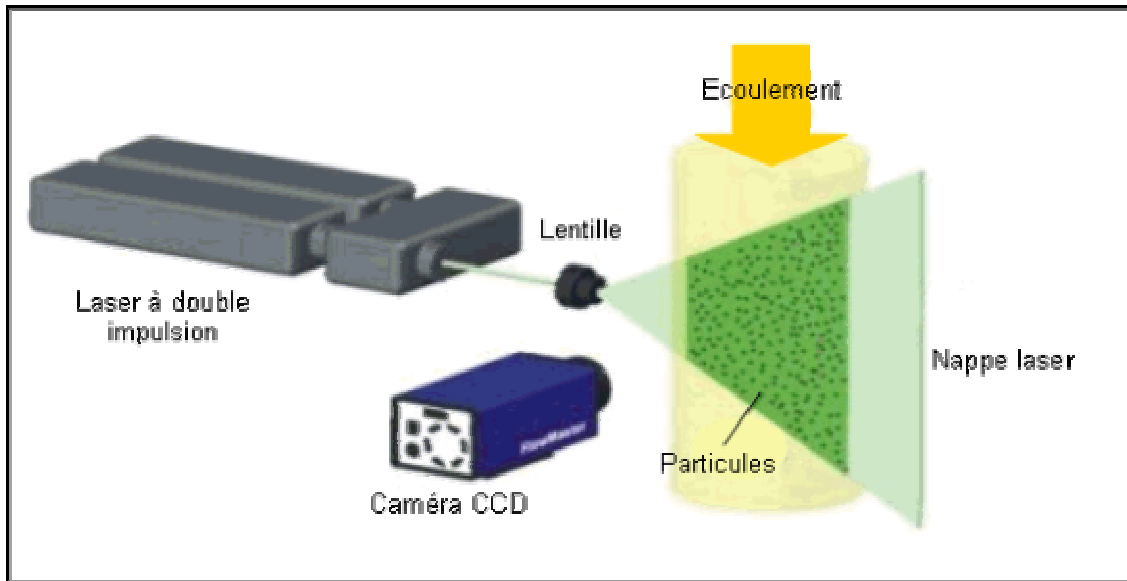


Fig. 3 Schéma de principe de la mesure PIV d'après [1].

Un banc hydraulique (Fig. 4) muni d'une pompe et de deux rotamètres alimente la prémaquette en Plexiglas (Fig. 5) constituée d'un tube de 4 mm de diamètre intérieur et 7 mm de diamètre extérieur ainsi qu'un tube indépendant contenant une mire.

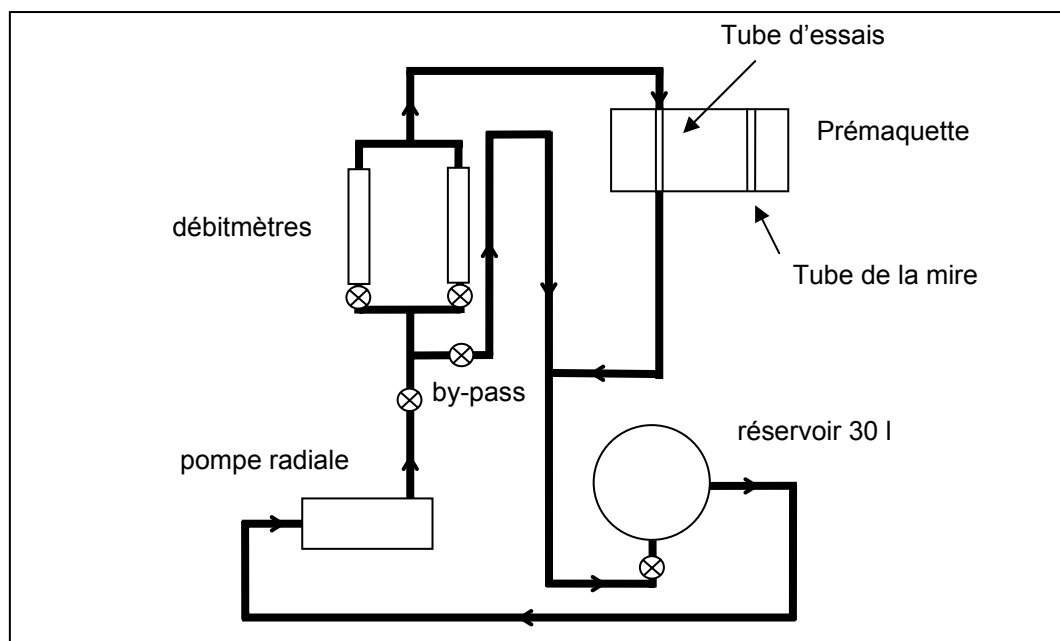


Fig. 4 Schéma du banc hydraulique d'après [1].

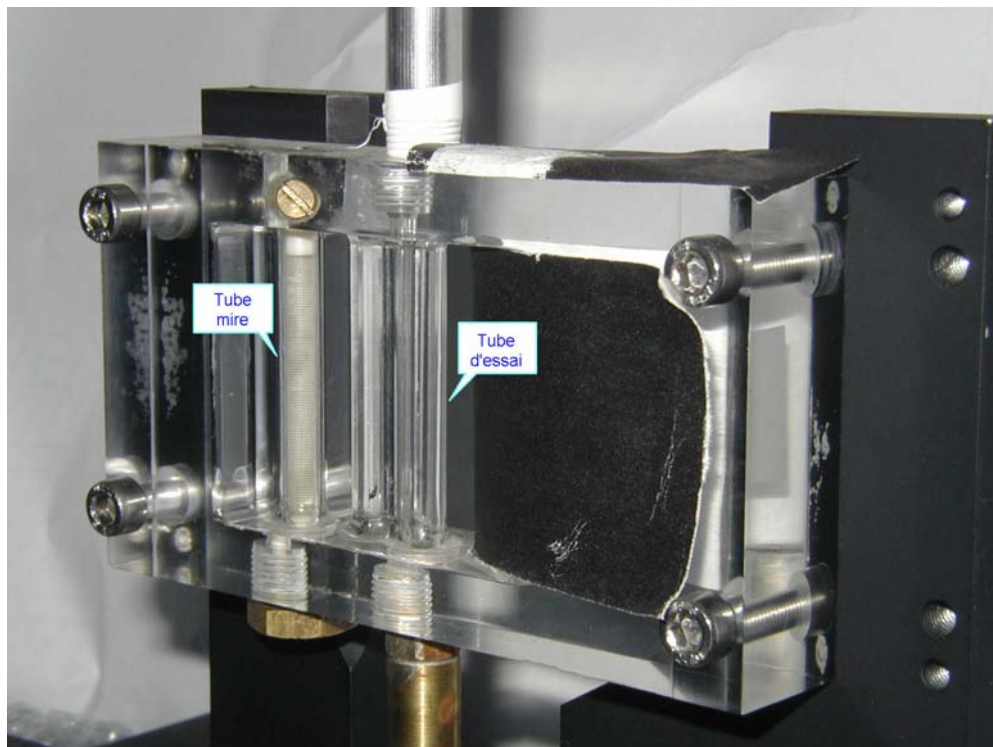


Fig. 5 Prémaquette en Plexiglas.

Cette mire permet de calculer le grandissement de l'image pour une mise au point donnée (Fig. 6).

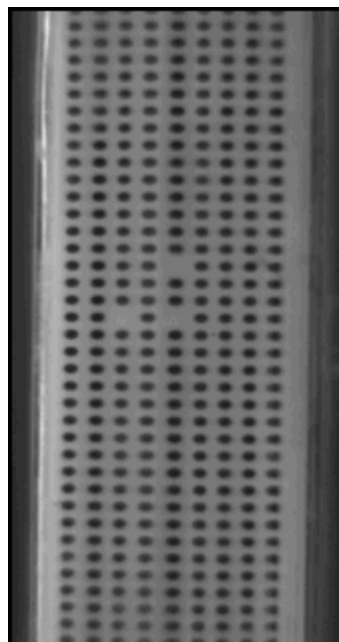


Fig. 6 Image de la mire d'étalonnage d'après [1].

Le réservoir est rempli d'eau déminéralisée etensemencée de microbilles de verre creuses argentées, de 10 μm de diamètre, qui constituent les traceurs de l'écoulement.

Une chaîne de mesure constituée d'une platine mobile permet de positionner solidairement la source laser, qui illuminera le tube, et la caméra d'acquisition des images (Fig. 7). Cette dernière est reliée à un ordinateur PC qui stocke et traite les images. Un système électronique gère la synchronisation de la caméra et du laser.

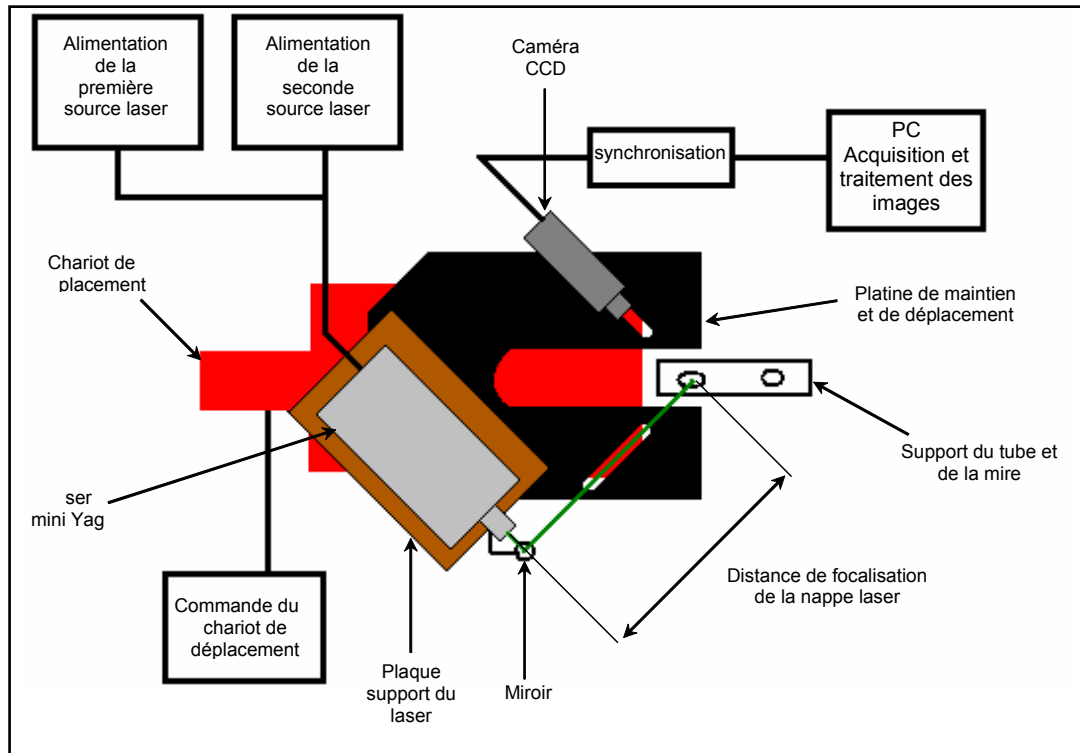


Fig. 7 Chaîne de mesure PIV d'après [1].

Les images saisies pendant les flashes laser (Fig. 8) sont traitées par paire par la méthode du flot optique [2]. La distorsion induite par le double dioptre air-Plexiglas-eau est corrigée.

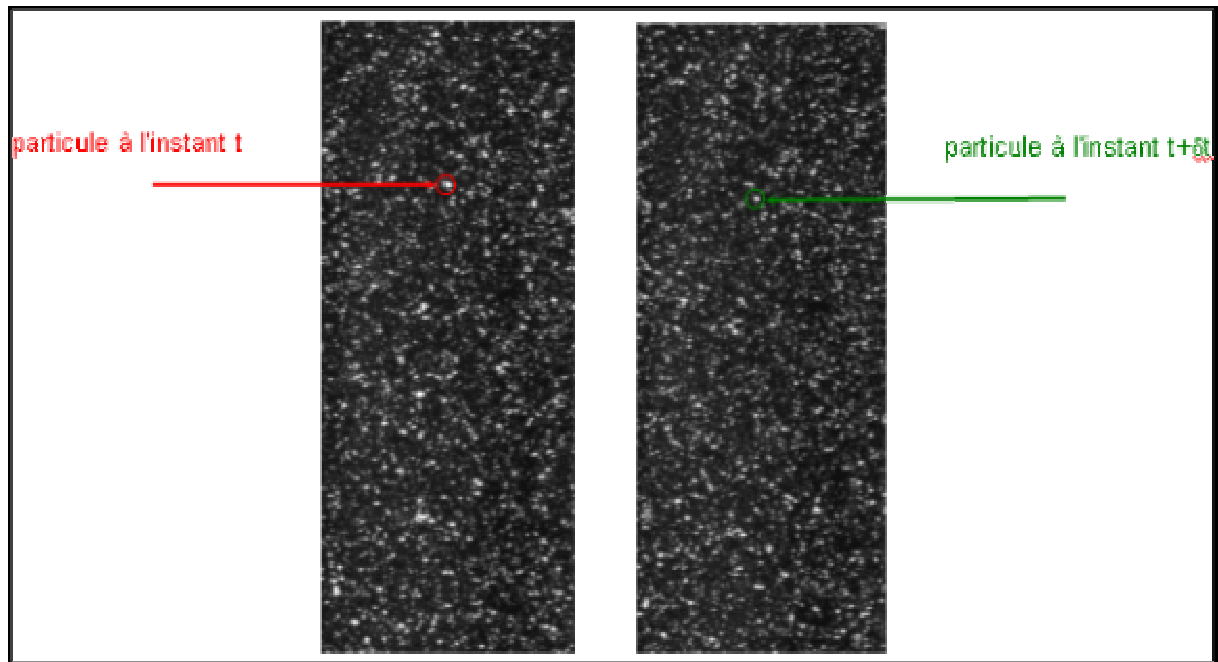


Fig. 8 Paire d'images successives par PIV d'après [1].

Les résultats du traitement nous donnent les champs de vitesses instantanées qui peuvent être moyennés sur plusieurs acquisitions (Fig. 9).

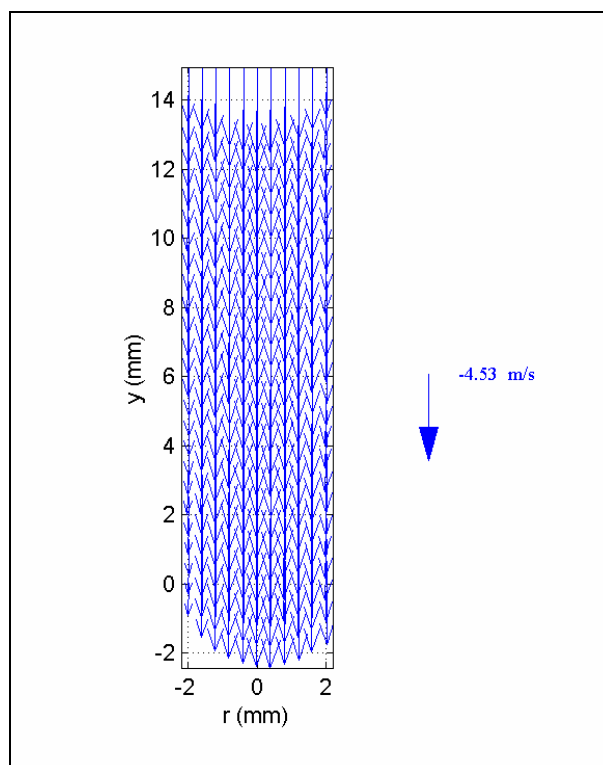


Fig. 9 Exemple de champ de vitesses moyen obtenu par PIV pour un débit de 3 l/min d'après [1].

L'ensemble de cette expérience avec une prémaquette a permis de valider la technique de mesure, de comprendre et résoudre les difficultés rencontrées. Le savoir faire acquis nous donne des indications précieuses pour la conception de la maquette définitive.

2.3. Expérience avec la maquette finale.

2.3.1. Description de la maquette.

La maquette complète est constituée d'un circuit principal comprenant un conduit d'entrée suivi d'un collecteur alimentant six tubes en parallèles, dont les extrémités sont reliées à un second collecteur vers la sortie. Elle comprend également deux tubes indépendants, l'un contenant une mire d'étalonnage, le second étant un tube isolé avec son entrée et sa sortie propres (Fig. 10). Les tubes sont réalisés en verre, leur diamètre est de 4 mm intérieur, 6 mm extérieur et d'une longueur hors tout de 50 mm. Les sections d'entrée et de sortie du circuit principal ont un diamètre de 8 mm et sont munies de prises de pression. En cas de nécessité chaque tube peut être remplacé car cette maquette est entièrement démontable. La mire est accessible et amovible sans démontage de l'ensemble.

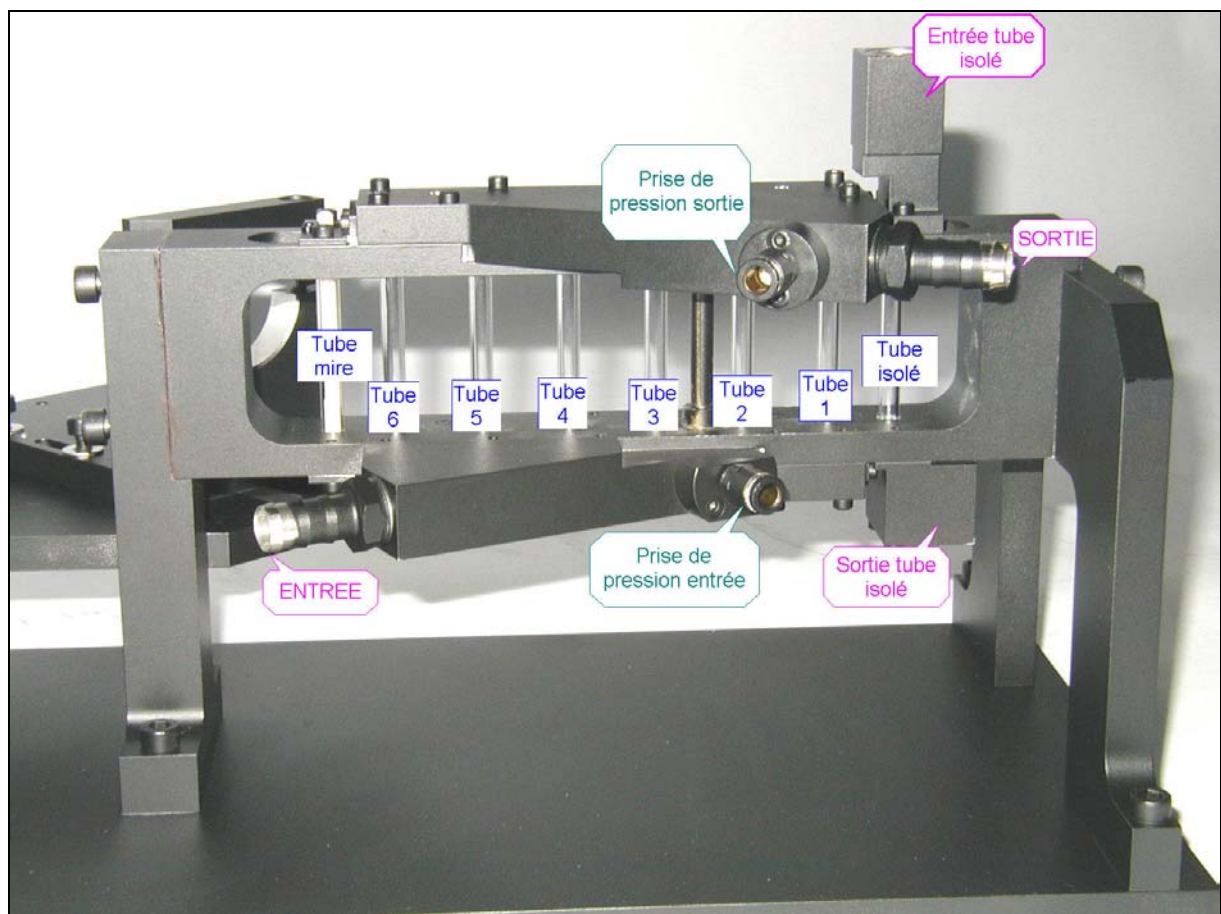


Fig. 10 Description de la maquette.

2.3.2. Dispositif expérimental (Fig. 12).

La maquette est fixée sur le banc expérimental qui supporte la caméra et la tête laser solidaires d'une platine mobile par rapport à la maquette. Cette platine animée d'un mouvement de translation, d'une précision de 1 μm , permet le positionnement successif de la nappe laser sur la génératrice de chacun des tubes (Fig. 11).

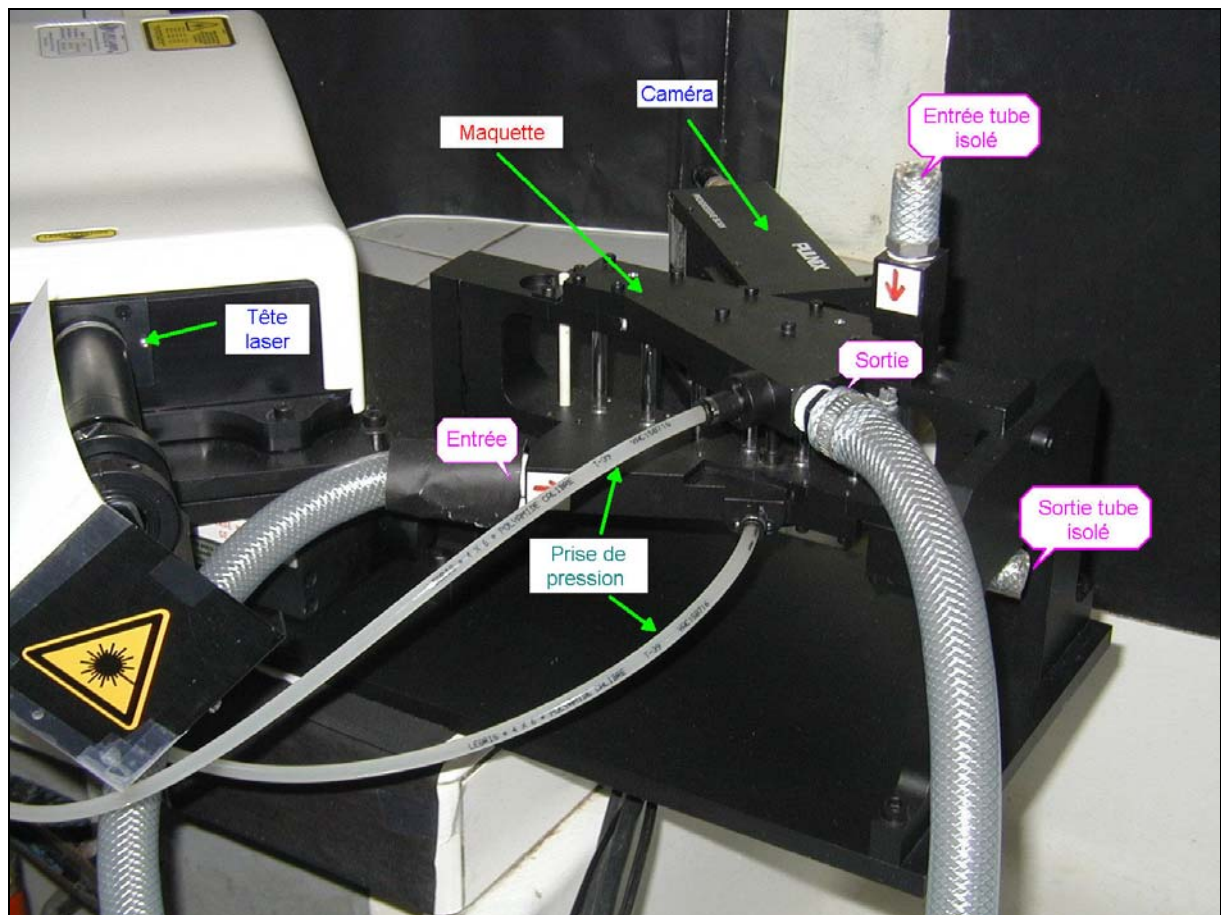


Fig. 11 Maquette montée sur le banc expérimental.

Le banc hydraulique a été modifié pour atteindre un débit de plus de 18 l/min.

Toutes les mesures effectuées sur cette maquette ont été consignées dans deux rapports cités en référence [3] et [4].

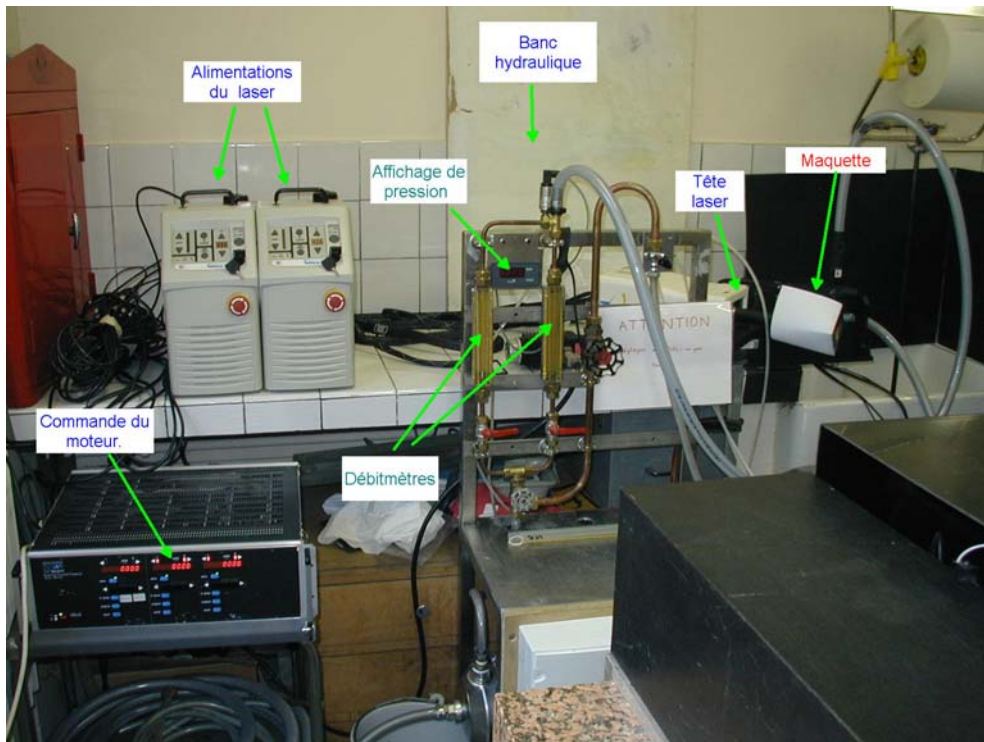


Fig. 12 Vue de l'ensemble du dispositif expérimental.

2.3.3. Mesures de pression.

Les mesures de pression à l'entrée et à la sortie du réseau des six tubes ont été faites pour des débits d'entrée allant de 2 à 21 l/min ; la précision des mesures est de 0.01 bar (10^3 Pa).

La différence de pression entrée/sortie, ou perte de charge, est représentée sur la Fig. 13.

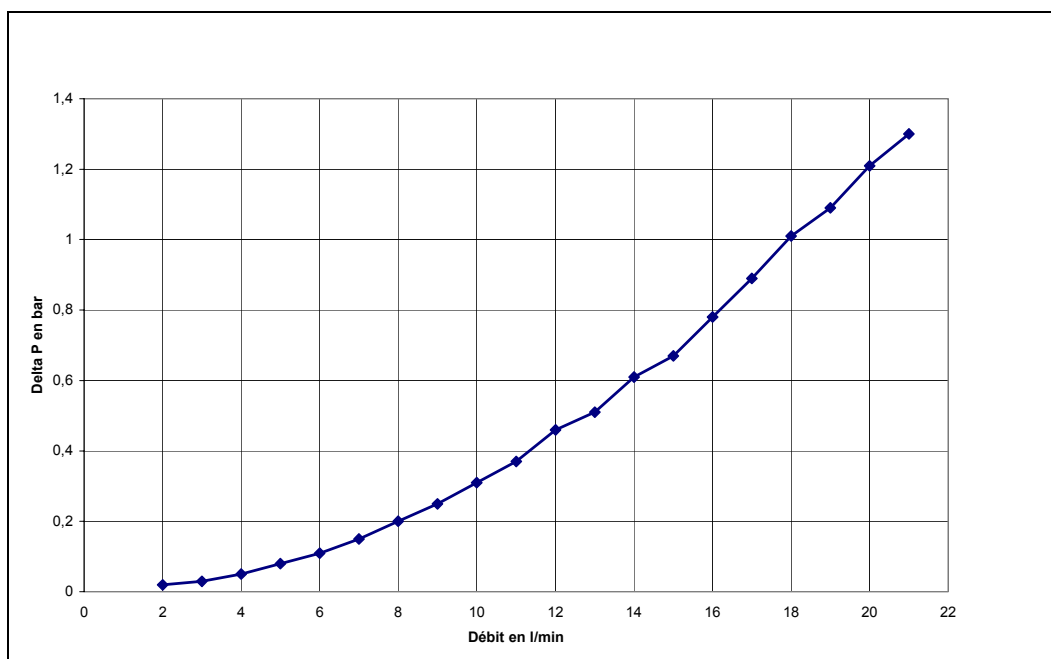


Fig. 13 Perte de charge entre l'entrée et la sortie de la maquette d'après [3].

2.3.4. Mesures sur le tube isolé.

Le banc expérimental ayant subi des modifications nous utilisons dans un premier temps le tube isolé de la maquette afin de valider le protocole expérimental, effectuer le réglage de la nappe laser (Fig. 14), mettre au point une méthode de filtrage des images pour éliminer les réflexions parasites (1, 2, 3 Fig. 15) et le bruit de fond (4 Fig. 15). Des mesures sont faites avec des débits allant de 1,5 l/min à 5 l/min pour les comparer avec celles effectuées sur la prémaquette.

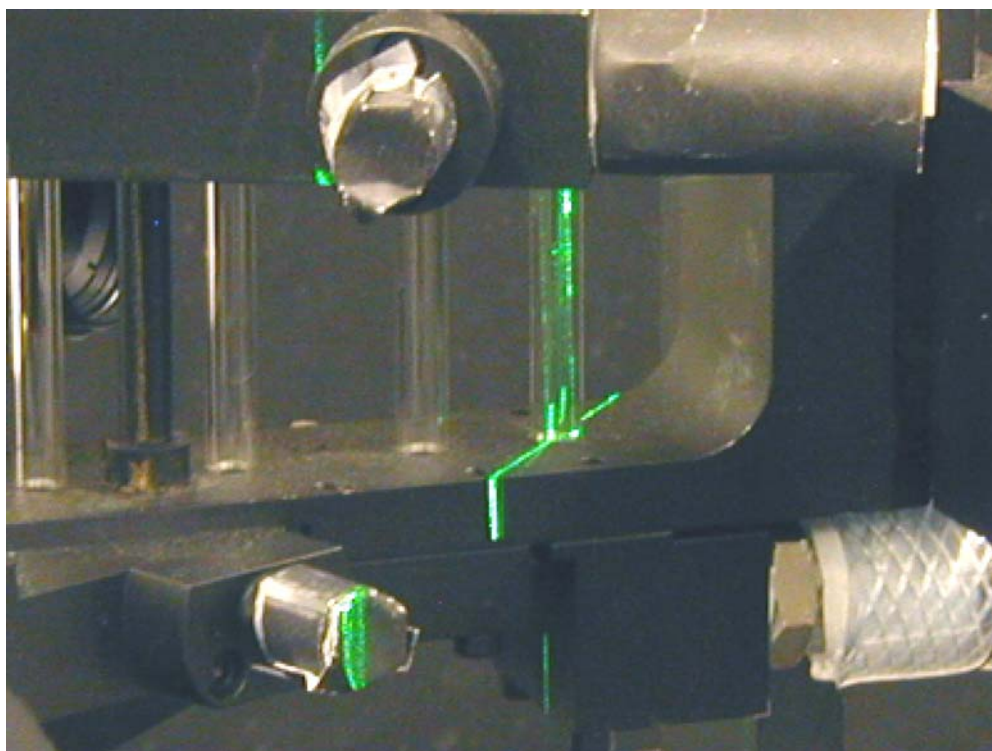


Fig. 14 Positionnement de la nappe laser sur le tube isolé.

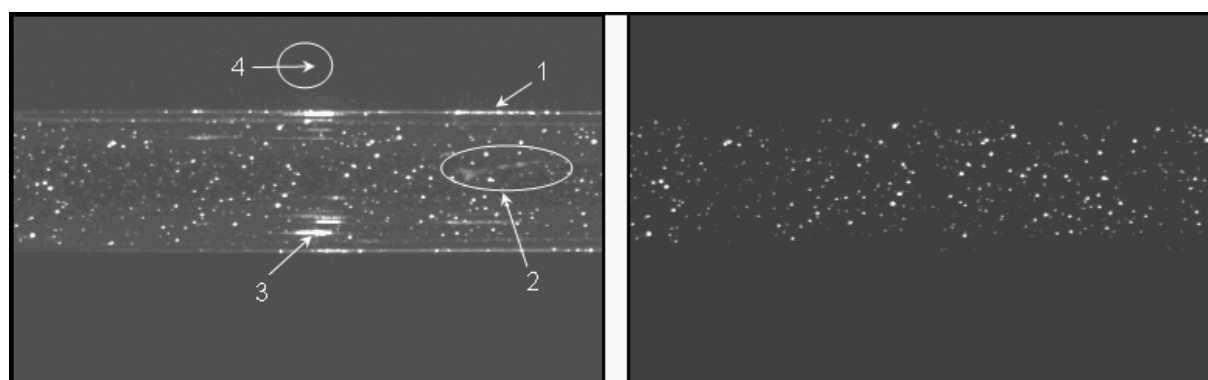


Fig. 15 Comparaison entre une image brute et une image filtrée d'après [3].

2.3.5. Mesures sur le réseau de six tubes.

L'étude de l'écoulement dans le réseau des six tubes est menée pour cinq débits d'entrée allant de 3 l/min à 15 l/min. Pour chaque tube on calcule un champ moyen de vitesses sur une zone de 22 mm de long éclairée par la nappe laser. Cette moyenne est faite sur un échantillon de 300 champs PIV instantanés soit l'acquisition de 600 images par tube pour un débit d'entrée fixé. La distribution des vitesses dans chaque tube est représentée sur la Fig. 16 . On remarque une forte disparité dans la répartition des vitesses dans les tubes, néanmoins on observe que l'allure de la distribution est identique aux différents débits d'entrée. Ceci sous entend que le régime d'écoulement est le même dans la plage de débits d'entrée explorée. La vitesse débitante maximale est toujours celle qui traverse le tube n°2, ce dernier étant le plus proche de l'entrée dans le réseau. Pour cette plage de débits d'entrée nous n'avons pas observé de comportement chaotique quant à la répartition des vitesses caractéristiques dans le réseau.

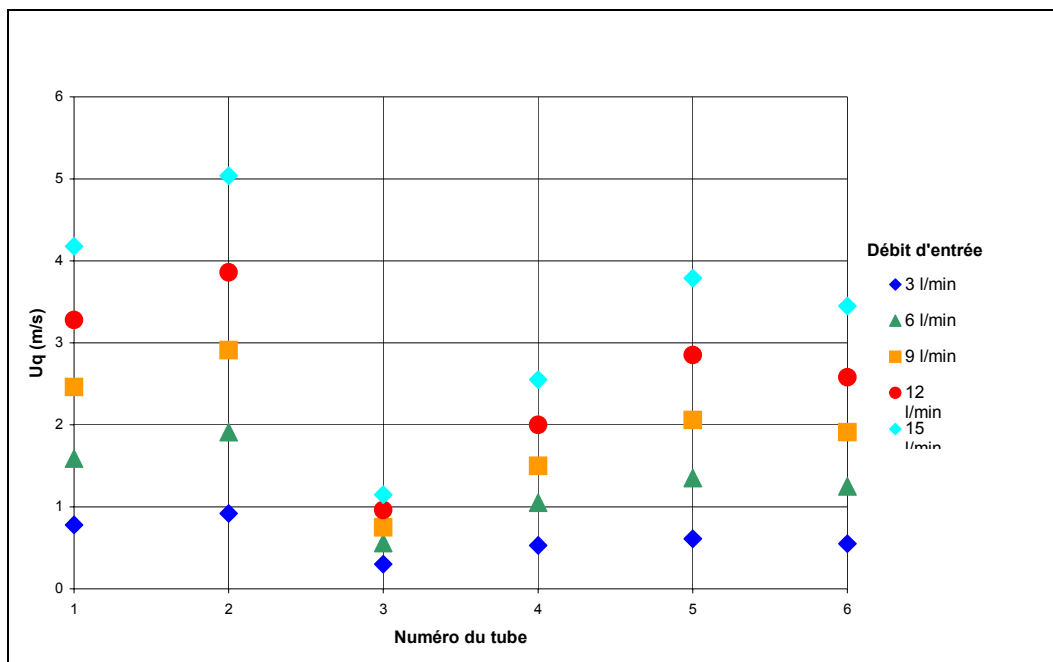


Fig. 16 Evolution des vitesses dans chaque tube en fonction du débit d'entrée d'après [4].

Si l'on s'intéresse à l'évolution des vitesses dans les tubes, la représentation des champs moyens, des vitesses axiales et radiales, par exemple dans le tube n°2 (Fig. 17), mettent en évidence l'inhomogénéité des profils et le caractère non établi des écoulements, avec un fort gradient de vitesse selon la direction radiale.

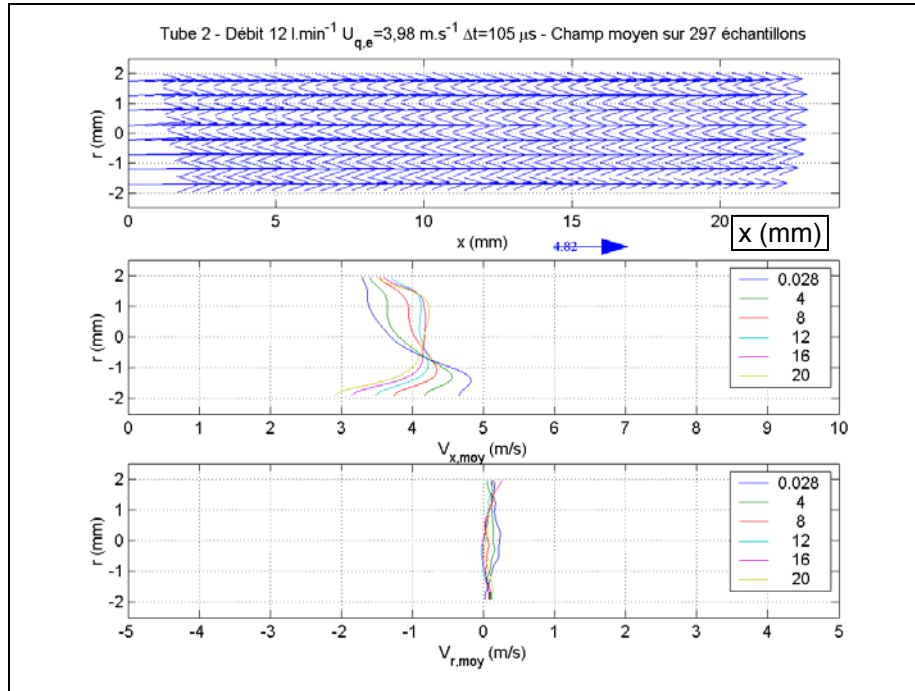


Fig. 17 Champ de vitesses moyen (1 vecteur sur 20), vitesses axiales et radiales suivant 6 positions en x pour un débit d'entrée de 12 l/min dans le tube n°2 d'après [5].

L'acquisition de champs instantanés permet de calculer les variances des fluctuations de vitesses [5]. Les Fig. 18 , Fig. 19 , et Fig. 20 représentent les trois composantes du tenseur de Reynolds accessibles à cette mesure pour un débit d'entrée de 12 l/min dans les tubes 1 à 6. L'évolution de ces moments dans le tube n°2, traversé par le débit maximum, identifie dans la zone d'entrée où l'écoulement n'est pas établi, de forts niveaux de turbulence. Ceux-ci tendent à s'atténuer vers la sortie.

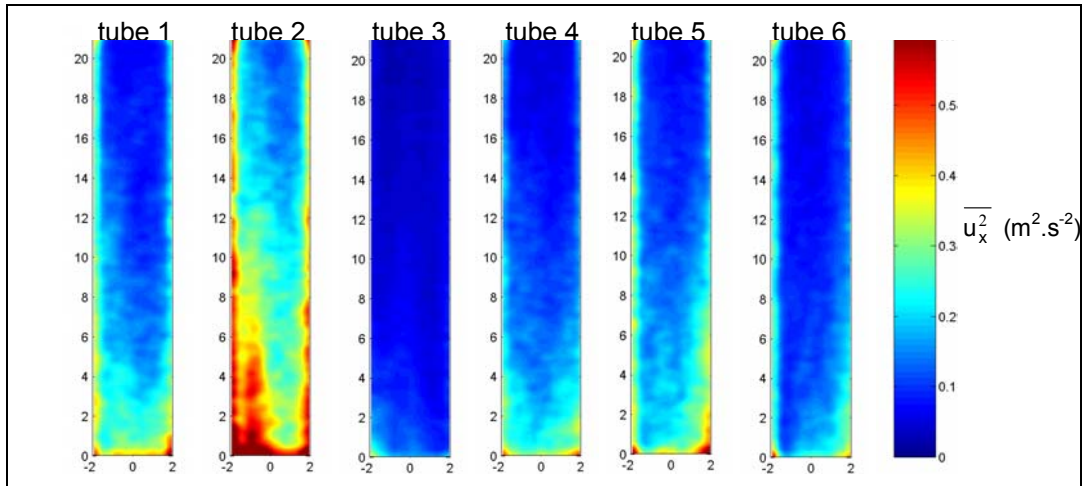


Fig. 18 Variance des fluctuations de vitesse axiale pour un débit d'entrée de 12 l/min d'après[5].

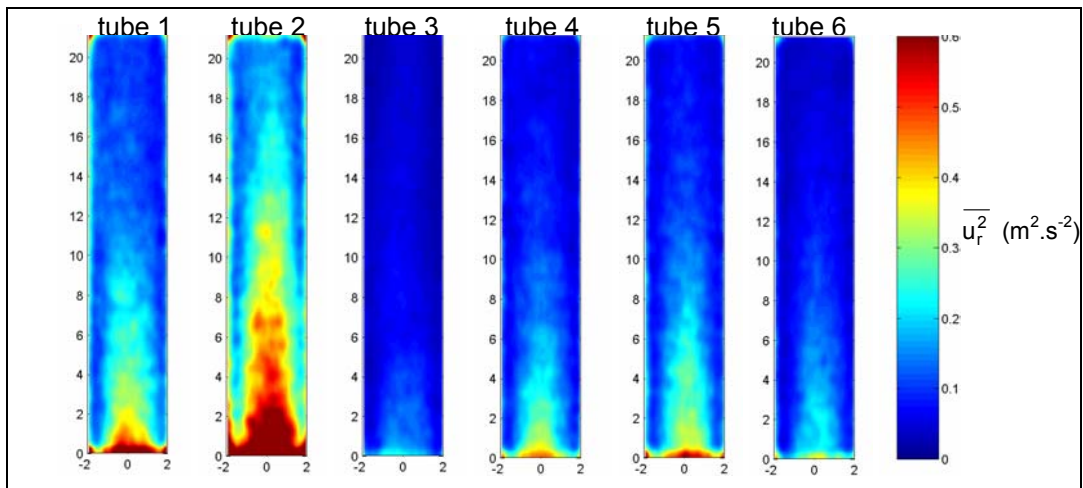


Fig. 19 Variance des fluctuations de vitesse radiale pour un débit d'entrée de 12 l/min d'après[5].

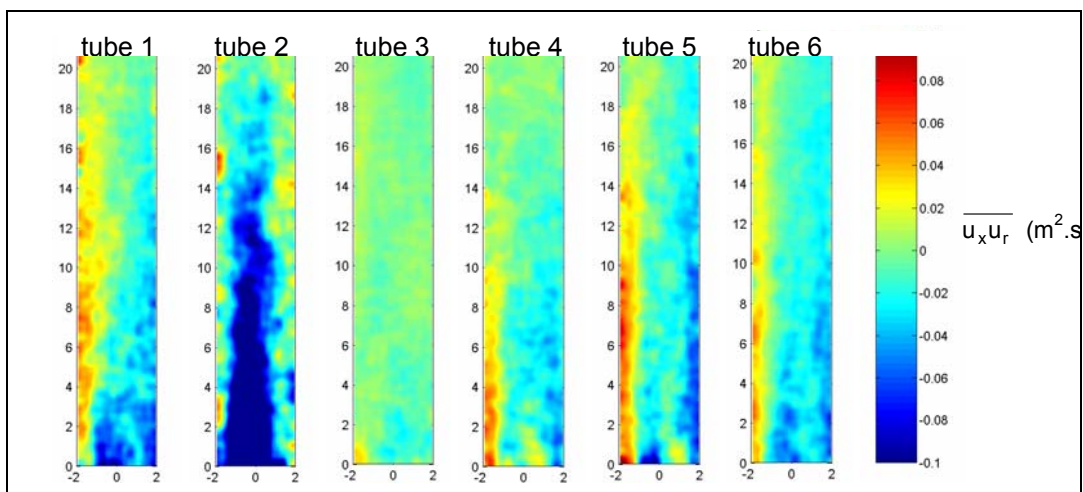


Fig. 20 Covariance des fluctuations de vitesse axiale et radiale pour un débit d'entrée de 12 l/min d'après [5].

2.4. Commentaires.

Les études sur une prémaquette ont permis d'adapter la mesure par PIV au contexte expérimental à savoir les faibles dimensions spatiales du champ de mesure et la plage de variation des vitesses à explorer. Cette première étape avec la prémaquette nous a conduit vers des choix techniques et technologiques pour la réalisation de la maquette complète.

La mise en œuvre de la méthode de mesure de vitesses par PIV a révélé le comportement caractéristique de cette maquette d'échangeur thermique. L'analyse des champs de vitesse montre une distribution non uniforme des débits dans les tubes et le caractère non établi des écoulements dans cette structure tridimensionnelle. Les champs de vitesses instantanés donnent accès aux niveaux de turbulence de ces écoulements. Cette distribution présente un comportement non chaotique pour des débits d'entrée compris entre 3 l/min et 15 l/min.

3. Simulations numériques.

3.1. Généralités.

Le but de ces simulations est de comparer les résultats des calculs aux mesures présentées précédemment, en utilisant le logiciel I-DEAS [6] avec son module fluide ESC [7].

La géométrie dessinée représente les volumes empruntés par l'écoulement dans la maquette à l'échelle 1.

Plusieurs configurations d'écoulement ont été testées ; nous présentons ici les résultats de 3 cas de calculs parmi les plus pertinents :

- Cas n°1 : étude de 3 modèles à éléments finis de densité de maillage différente.
- Cas n°2 : étude avec cinq conditions d'entrée nominales sur un modèle.
- Cas n°3 : étude avec cinq conditions d'entrée de mesure sur un modèle.

3.2. Modélisation.

La maquette est représentée par une géométrie à l'échelle 1, formée de canaux connectés aux collecteurs d'entrée et de sortie, alimentant le réseau des six tubes (Fig. 21).

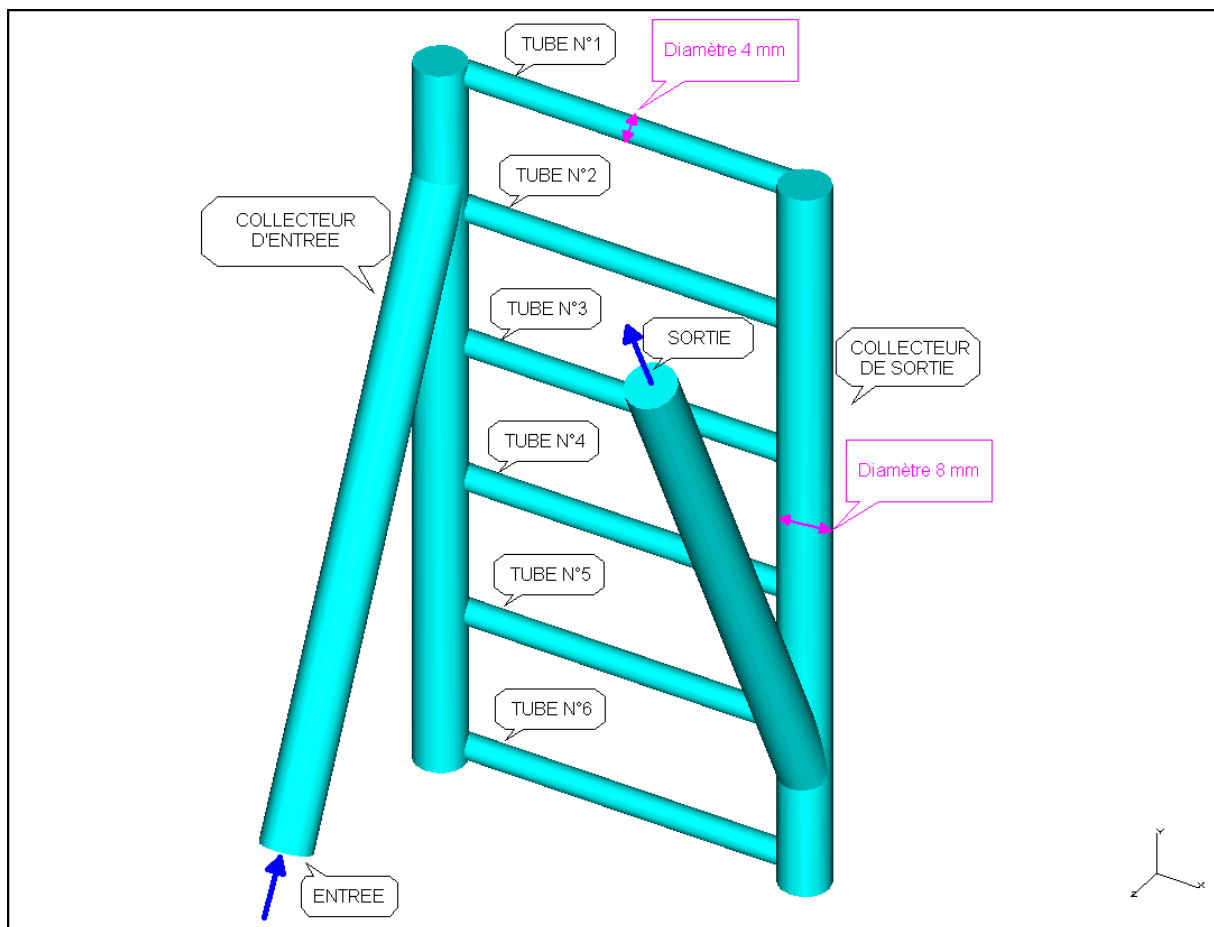


Fig. 21 Modèle géométrique de la maquette.

Les volumes sont maillés avec des éléments tétraédriques du premier ordre, les surfaces extérieures enveloppant les volumes sont maillées avec des éléments triangulaires.

Les calculs sont de type linéaire réalisés en régime établi. Pour les cas présentés le solveur d'écoulement utilise le modèle « longueur de mélange » avec un schéma d'advection du 2^{ième} ordre.

On peut définir une rugosité sur les surfaces extérieures canalisant l'écoulement, qui sera prise en compte lors du calcul. Les meilleurs résultats sont obtenus pour une rugosité nulle sur les surfaces des tubes de diamètre 4 mm et de 10 μm pour les autres surfaces (Fig. 22).

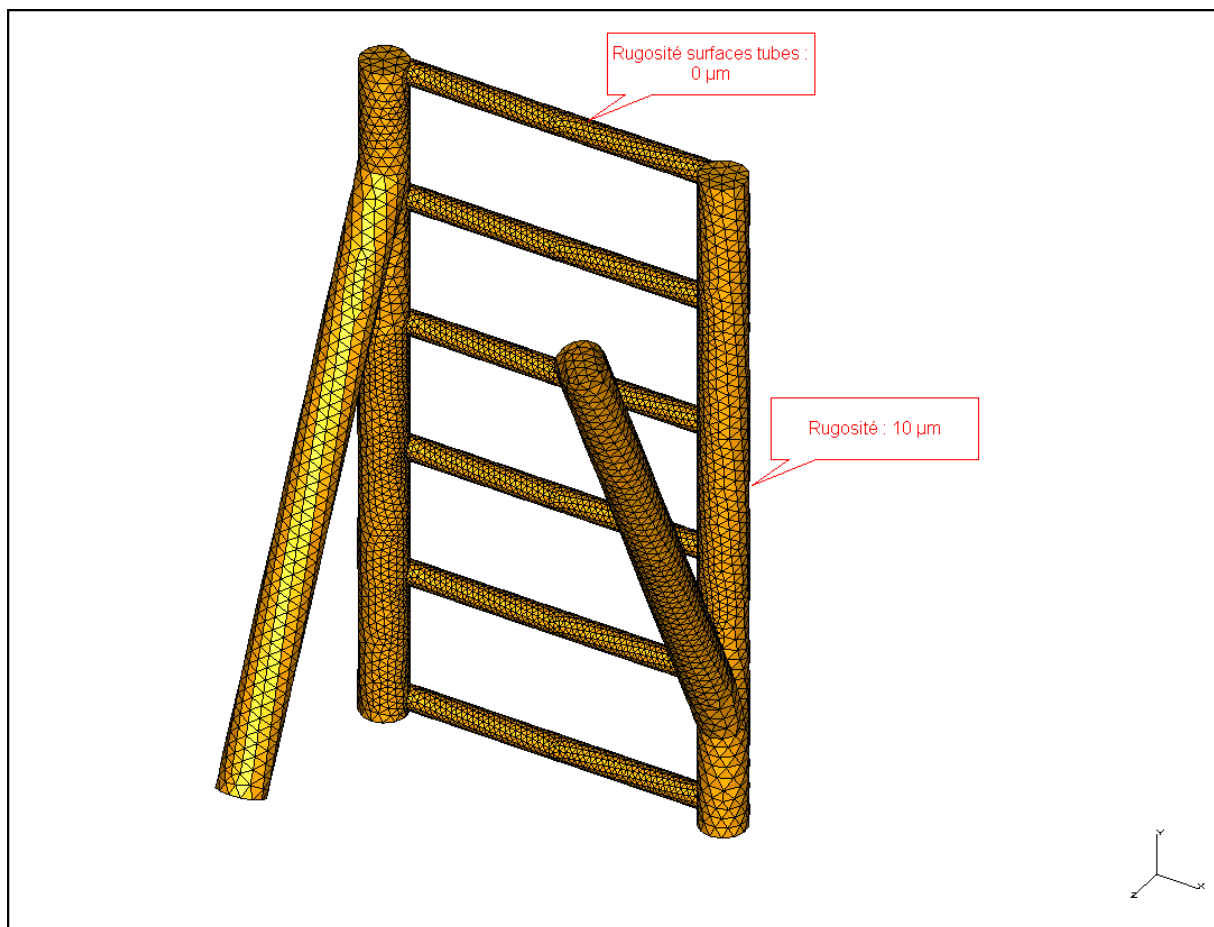


Fig. 22 : Surfaces d'écoulement avec leurs rugosités.

Les comparaisons entre les calculs et les mesures se font avec les valeurs moyennes de vitesses de l'eau dans les tubes de diamètre 4 mm. Ces moyennes sont calculées sur un domaine d'environ 22 mm de long correspondant à la zone des tubes de verre de la maquette éclairée par le laser et cadrée dans le champ de la caméra (Fig. 23).

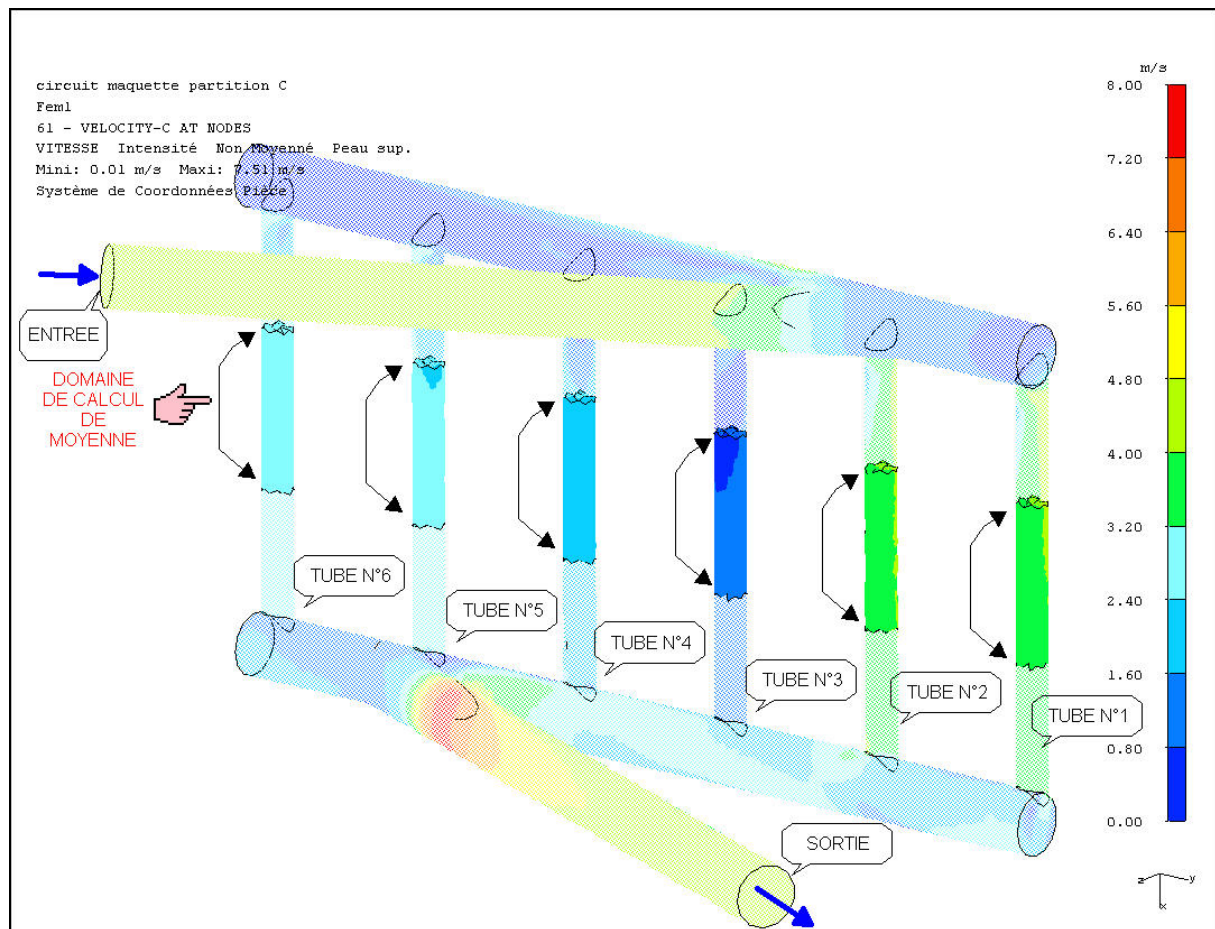


Fig. 23 Domaines de calcul de la vitesse moyenne.

3.3. Calculs.

3.3.1. Cas n°1 :

Les calculs sont faits sur trois modèles nommés C, D, E. Ces derniers comportent respectivement 123571 éléments pour le modèle C, 54631 éléments pour le modèle D et 634561 éléments pour le modèle E. Le débit d'entrée est fixé à 12 l/min pour chaque modèle.

En observant les résultats des vitesses sur l'ensemble de la maquette, Fig. 24, Fig. 25 et Fig. 26, et bien que les modèles C et D semblent les plus proches il n'y a pas globalement de fortes différences dans les répartitions des vitesses dans les tubes.

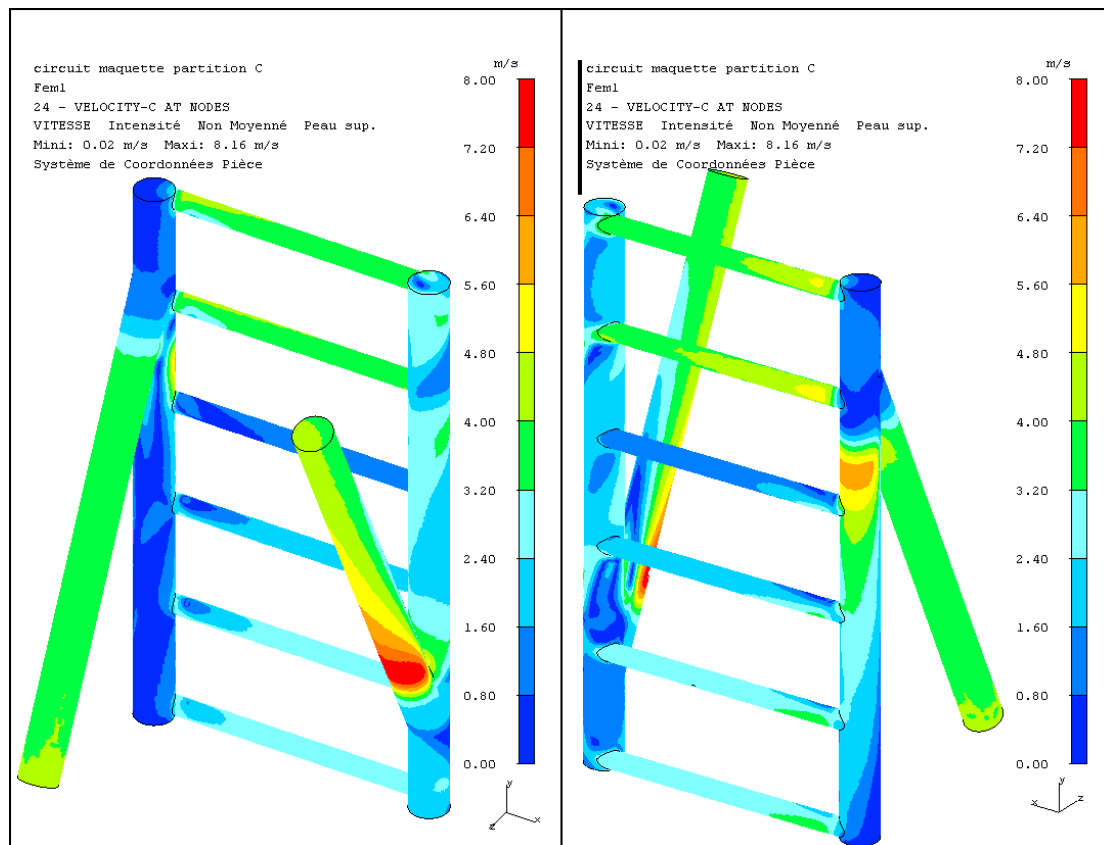


Fig. 24 Modèle C : Vitesses pour un débit d'entrée de 12 l/min.

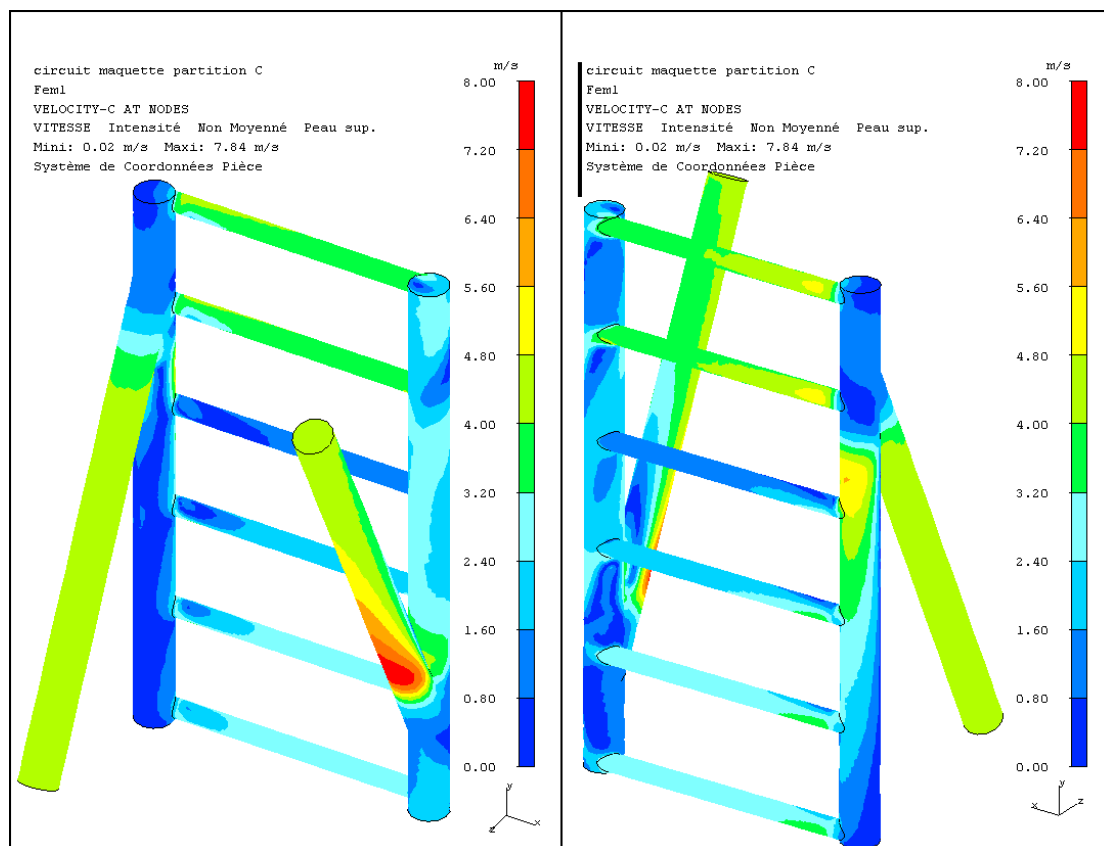


Fig. 25 Modèle D : Vitesses pour un débit d'entrée de 12 l/min.

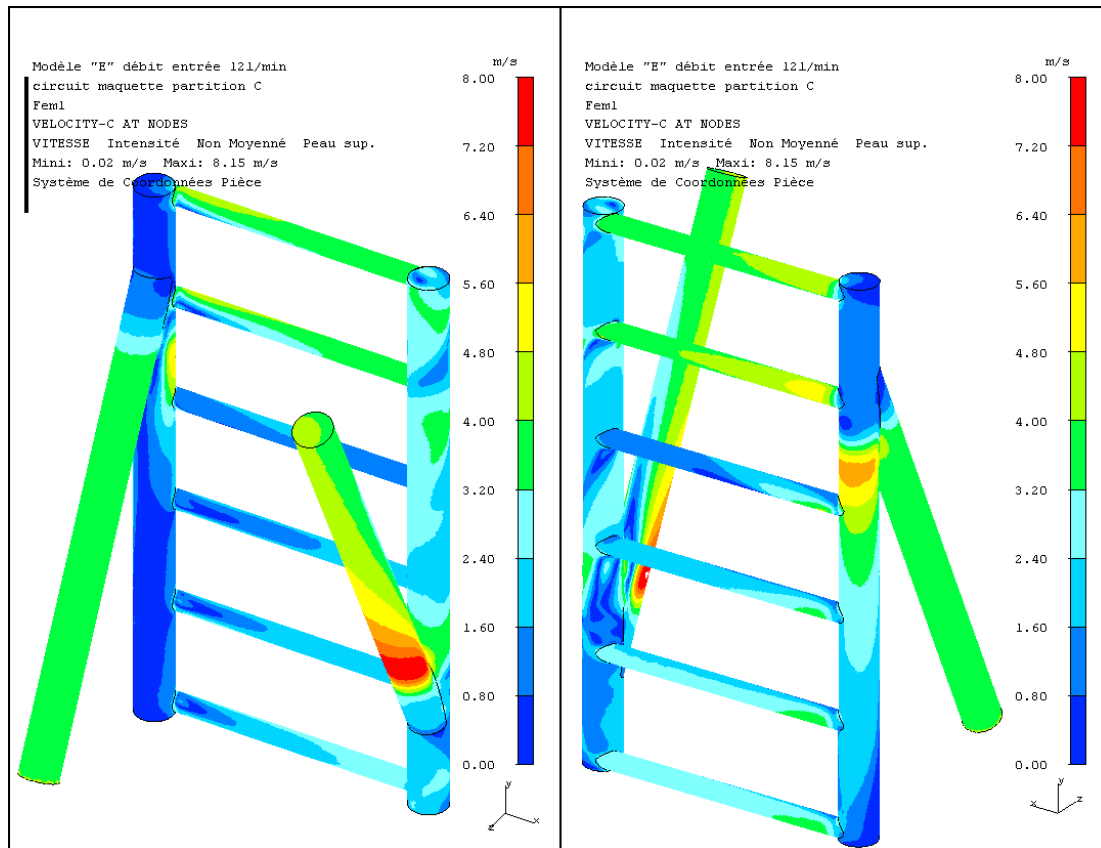


Fig. 26 Modèle E : Vitesses pour un débit d'entrée de 12 l/min.

Les vitesses moyennes ont été calculées dans chacun des tubes de 4 mm, suivant la méthode décrite précédemment (§ 3.2), pour les trois modèles, et comparées aux mesures (points en vert sur la Fig. 27).

On constate que les moyennes calculées suivent relativement bien l'évolution des vitesses mesurées pour chaque tube.

Si l'on exprime ces résultats en termes d'erreur, un calcul d'écart relatif entre les vitesses moyennes calculées dans chaque tube et la mesure, indique que ces erreurs sont inférieures à $\pm 17,5\%$ pour les 3 modèles, sauf pour le tube n°3 dans le modèle E (Fig. 28).

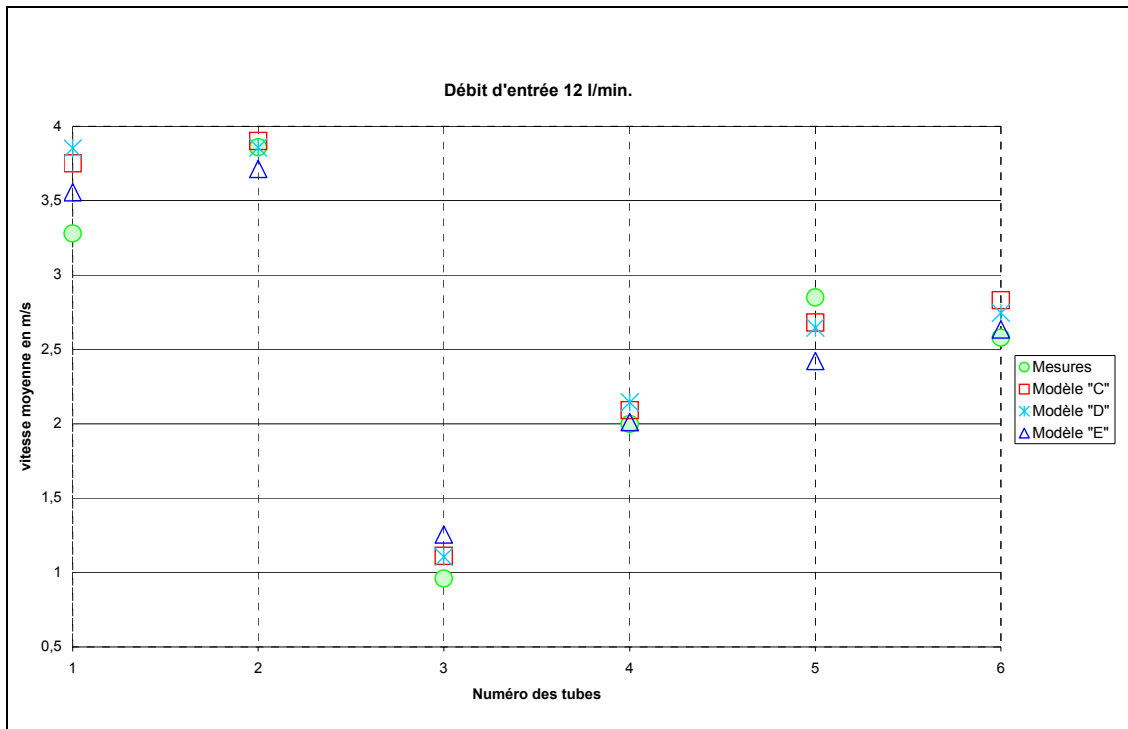


Fig. 27 Vitesses moyennes calculées avec les modèles C, D, E et la mesure.

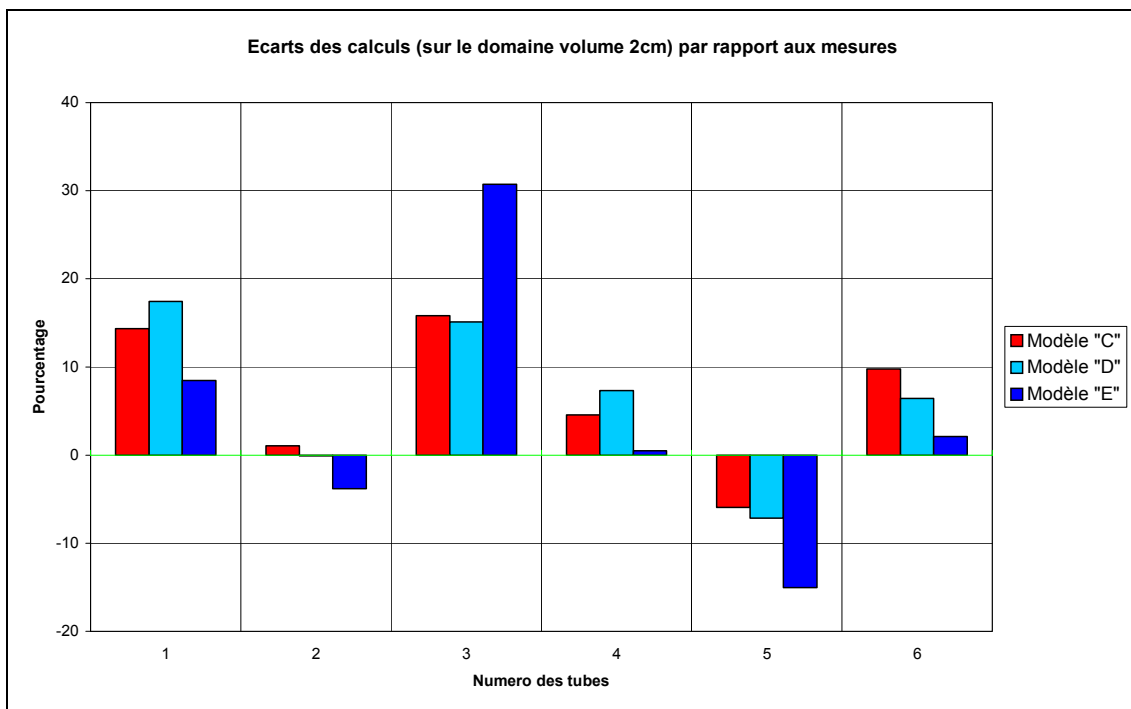


Fig. 28 Erreur relative pour chaque tube entre les calculs et la mesure.

3.3.2. Cas n°2 :

Afin de pouvoir comparer le modèle numérique aux mesures PIV faites sur la maquette nous avons effectué plusieurs calculs sur un même modèle (modèle G) identique en taille au modèle D, en changeant les conditions d'entrée correspondant à l'expérience. Soit cinq débits d'entrée de 3, 6, 9, 12 et 15 l/min. L'évolution du débit dans chaque tube en fonction du débit d'entrée est représentée Fig. 29 . On constate que la distribution des vitesses caractéristiques entre les différents tubes est très proche des vitesses mesurées aux écarts de calculs près.

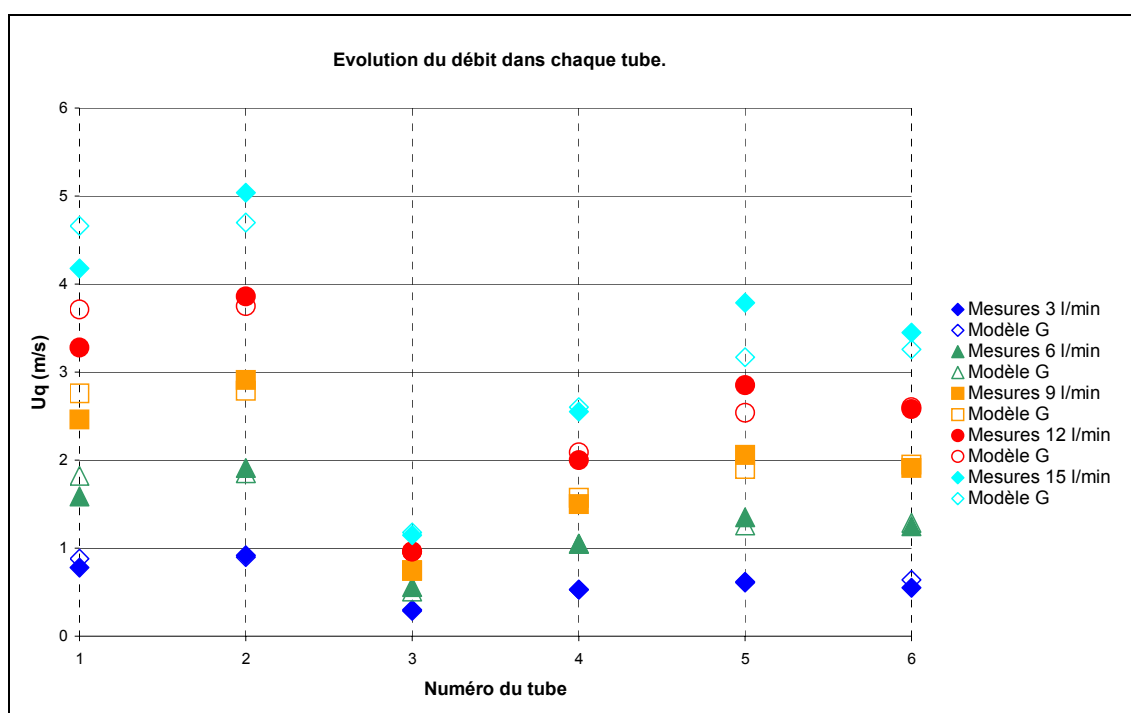


Fig. 29 Vitesses caractéristiques mesurées et calculées dans chaque tube pour cinq débits d'entrée.

Les écarts relatifs entre les valeurs moyennes calculées et les valeurs mesurées sont tracés sur la Fig. 30. La dispersion de ces valeurs se situe dans une gamme de +20% à -13%.

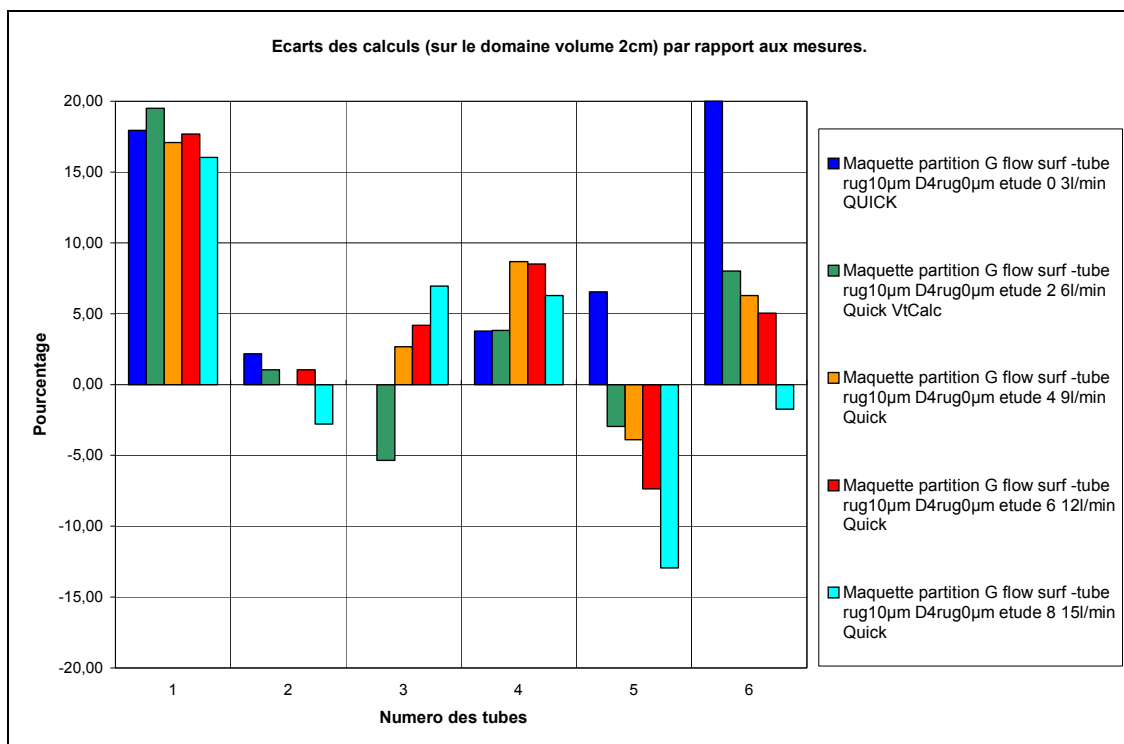


Fig. 30 Ecart relatifs pour chaque tube entre le calcul et la mesure cas n°2.

3.3.3. Cas n°3 :

Les calculs sont relancés sur le même modèle en mettant comme condition d'entrée les valeurs nominales des vitesses correspondant aux débits du cas n°2 sur l'entrée de la maquette. Les écarts se situent dans une plage de $\pm 17\%$. En comparant les écarts relatifs calculés pour ce cas (Fig. 31) avec le cas précédent, on constate un décalage des courbes vers le bas.

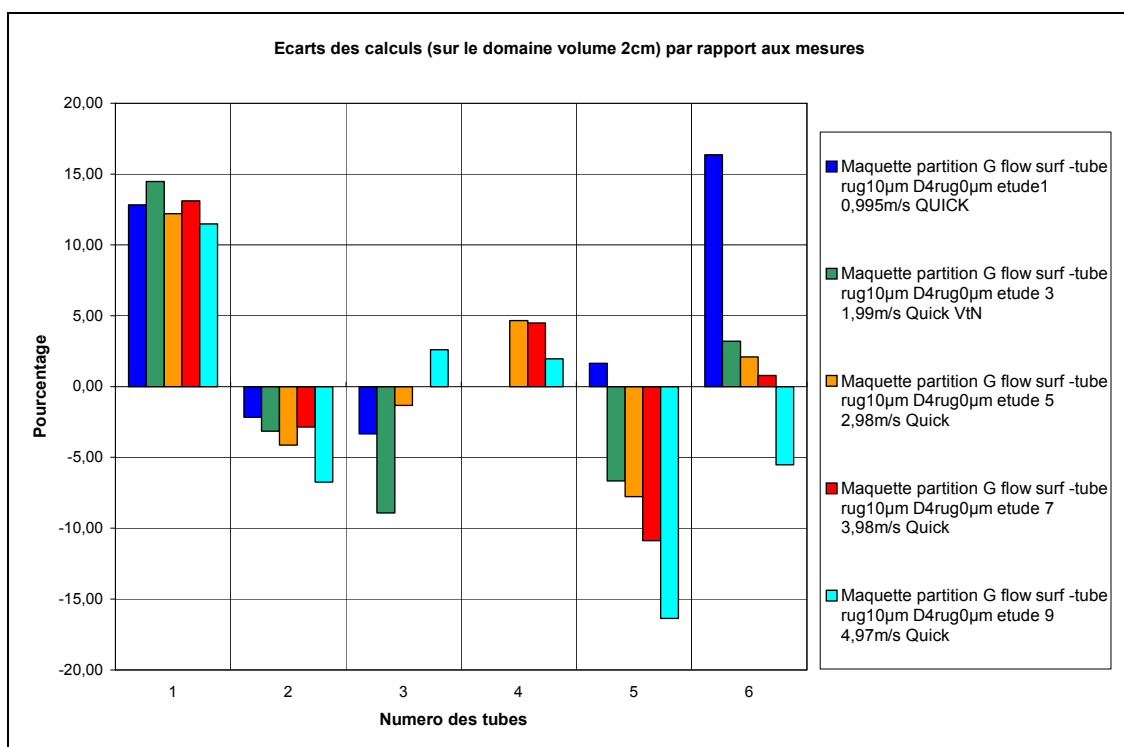


Fig. 31 Ecart relatifs cas n°3.

Ce décalage représente un biais systématique dans le cas de calcul n°2. Il est dû aux conditions initiales liées au maillage de la géométrie à savoir les débits imposés sur la surface d'entrée. En effet le maillage d'une surface circulaire par des éléments triangulaires ne restitue pas totalement cette surface. Le rapport δS entre l'aire de la surface circulaire $Acirc$ et l'aire du maillage triangulaire $Amaillage$ recouvrant cette surface est d'environ 1,039 dans notre cas (ou -3,9 %). L'application d'un débit nominal Qn sur une surface maillée correspond pour le calcul à une vitesse équivalente $Vcal$ supérieure à la vitesse nominale Vn telle que :

$$Vcal = Vn \times \delta S \quad \text{avec} \quad Vn = \frac{Qn}{Acirc} \quad \text{et} \quad \delta S = \frac{Acirc}{Amaillage}.$$

Qn et Vn sont les paramètres d'entrée de la maquette expérimentale. Les vitesses caractéristiques dans les tubes de la maquette Vt_i sont proportionnelles au débit d'entrée soit :

$$Vt_i = k_i \times \frac{Qn}{Acirc} \quad \text{ou bien} \quad Vt_i = k_i \times Vn \quad \text{avec} \quad i \in \{1;6\} \text{ numéro du tube,}$$

et pour le modèle numérique : $Vcalt_i = k'_i \times Vn \times \delta S$.

Or pour le cas n°2 nous avons imposé comme condition initiale un débit sur l'entrée.

Donc en appliquant aux vitesses moyennes calculées $Vcort_i$ dans les tubes du cas n°2 la correction suivante :

$$Vcort_i = \frac{Vcalt_i}{\delta S} \quad \text{en posant} \quad k_i \neq k'_i$$

nous retrouvons ainsi les valeurs qui correspondent aux vitesses calculées dans les conditions du cas n°3.

3.4. Profils de vitesse dans les tubes.

On observe que les vitesses calculées dans les tubes présentent des gradients reflétant le caractère non établi de l'écoulement Fig. 32.

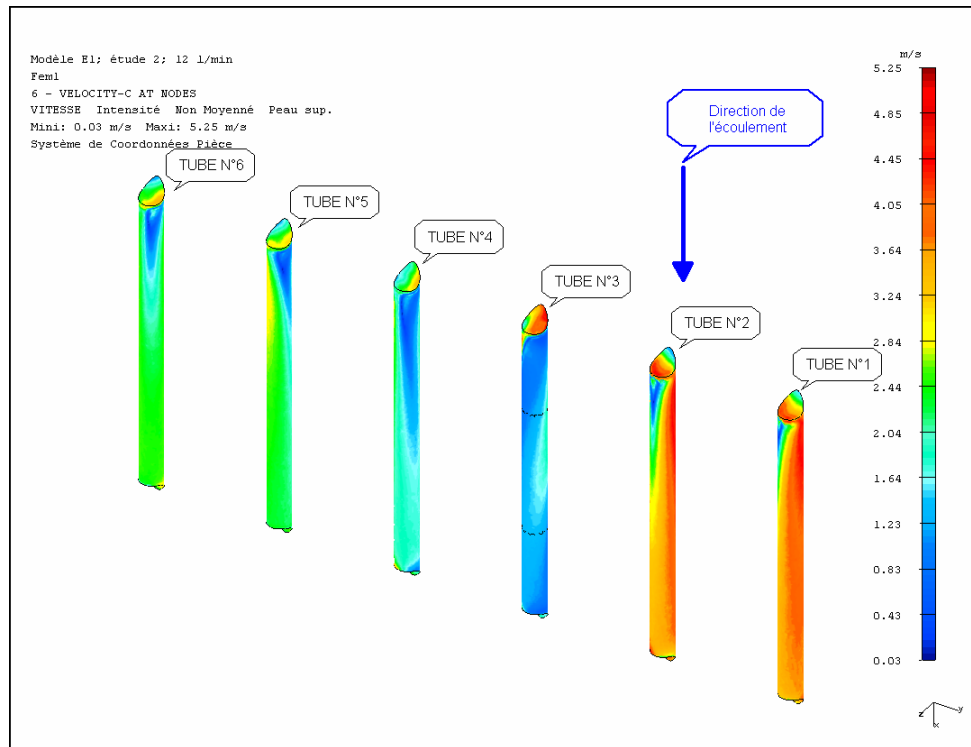


Fig. 32 Vitesses calculées pour un débit d'entrée de 12 l/min.

La résolution du maillage du modèle numérique n'étant pas aussi fine que la résolution de la mesure par PIV, on peut néanmoins tenter de comparer les vitesses calculées dans les tubes dans une tranche correspondant à la zone éclairée par le laser avec les profils de vitesses issues des mesures sur la maquette. Cette comparaison porte sur le caractère qualitatif des gradients de la composante suivant x des vitesses calculées et mesurées.

Nous prenons comme exemples les tubes n°2 et n°3 avec les vitesses calculées et mesurées pour un débit d'entrée de 12 l/min.

Le post traitement des résultats permet d'effectuer des coupes dans l'espace du modèle numérique. En coupant le tube n°2 par un plan positionné sur la zone explorée par le laser, nous obtenons les valeurs de la composante des vitesses suivant x, dans la direction de l'écoulement, représentées à gauche sur la Fig. 33. La partie droite de la Fig. 33 montre un agrandissement de la zone de mesure. En observant l'évolution radiale (suivant r) à différentes positions axiales (suivant x) nous constatons des lois de variation semblables avec l'évolution des vitesses mesurées Fig. 34. En $x = 0$ mm la vitesse est croissante de $r = +2$ mm à $r = -2$ mm. Cette tendance qui se prolonge vers les x positifs avec des maxima décroissants, se retrouve sur la Fig. 34 avec un décalage radial plus prononcé.

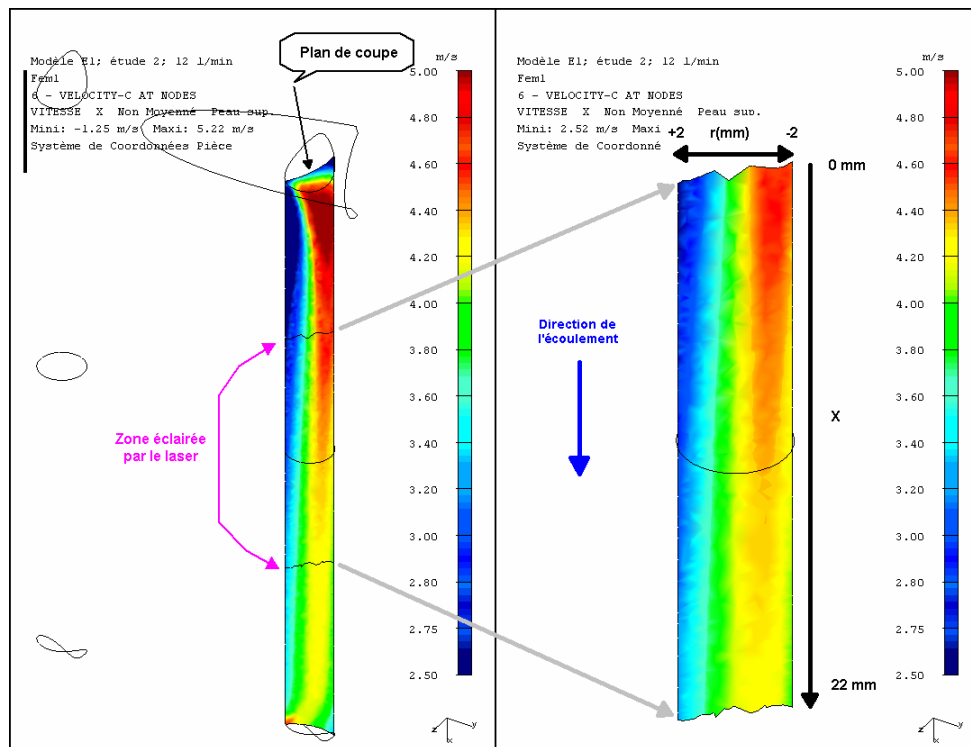


Fig. 33 Composante x des vitesses calculées dans le tube n°2 avec zoom sur la zone de mesure.

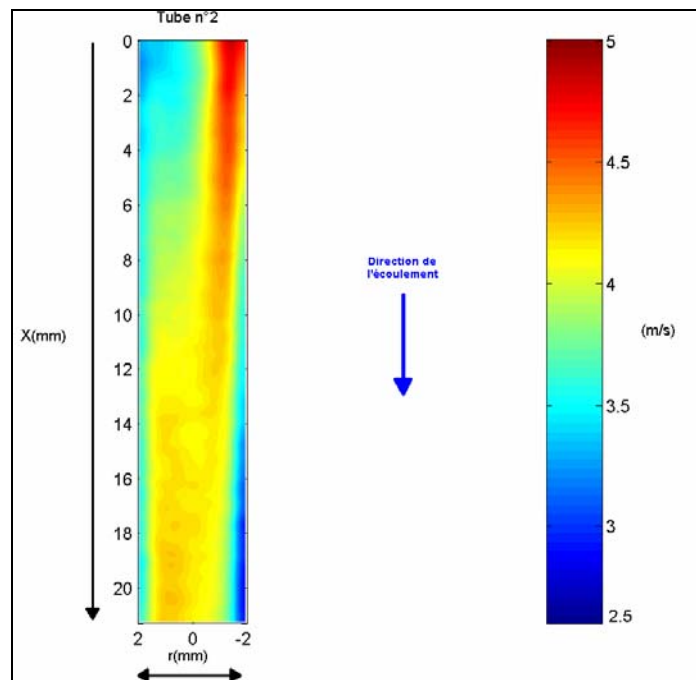


Fig. 34 Composante x des vitesses mesurées dans le tube n°2.

Nous appliquons la même méthode pour le tube n°3 (à gauche sur la Fig. 35). La zone de mesure représentée à droite de la Fig. 35 montre que la plage des valeurs calculées dans cette zone est supérieure à la dynamique des valeurs de mesure pour le tube n°3. Nous avons compressé l'échelle de couleur de la Fig. 35 dans ses parties supérieure et inférieure pour faciliter la comparaison avec la Fig. 36.

En $x = 0$ mm la vitesse radiale croît de $r = +2$ mm vers $r = -2$ mm (à droite sur la Fig. 35). Ce sens de variation se poursuit vers les x positifs avec les maxima décroissants. Cette tendance se stabilise aux alentours de $x = 10$ mm ; puis s'inverse tel que la vitesse croît de $r = -2$ mm à $r = +2$ mm à partir de $x = 12$ mm jusqu'à $x = 22$ mm. Ces évolutions de variations de vitesses se retrouvent sur les vitesses mesurées Fig. 36 avec une intensité moindre alors que l'inversion de sens débute en $x = 2$ mm. Toutefois on identifie deux structures semblables sur la Fig. 35 et la Fig. 36, l'une située dans la région $r = -2$ mm, $x = 0$ mm et l'autre dans la région $r > 0$ mm commençant en $x = 8$ mm. Les gradients sont plus faibles pour la vitesse mesurée (Fig. 36).

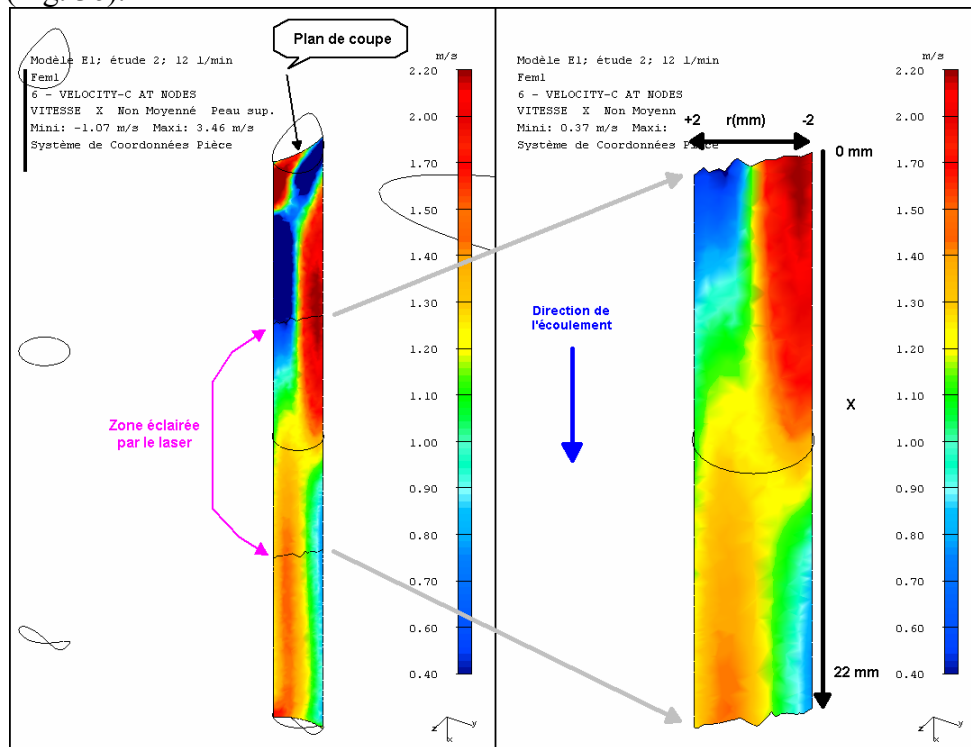


Fig. 35 Vue en coupe des vitesses dans le tube n°3 avec zoom sur la zone de mesure.

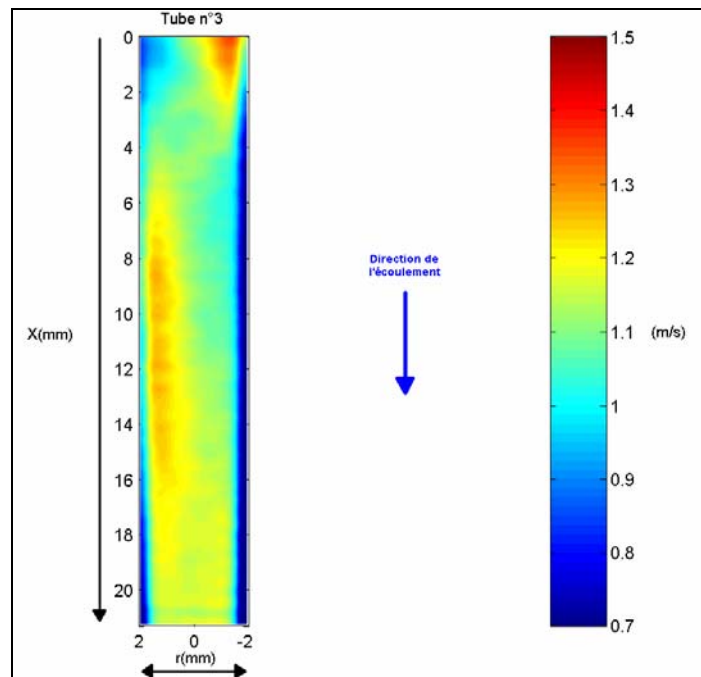


Fig. 36 Composante x des vitesses mesurées dans le tube n°3.

3.5. Commentaires.

L'ensemble des calculs effectués montre que les résultats convergent vers les mesures d'une manière satisfaisante. La distribution des vitesses moyennes calculées dans chaque tube suit les distributions issues des mesures avec les différents modèles testés. Les différences résiduelles entre la mesure et le calcul sont principalement attribuées aux causes suivantes:

- l'utilisation du modèle « longueur de mélange » du solveur, qui est intrinsèquement prévu pour des calculs en régime d'écoulement établi alors que la mesure révèle des profils de vitesse non établis.
- le paramétrage du solveur s'applique d'une manière globale au modèle à éléments finis.
- les simplifications inhérentes à la mise en modèle d'un problème réel (par exemple les détails des intersections des tubes ne sont pas pris en compte).
- la résolution spatiale du modèle numérique qui ne peut pas atteindre l'échelle de résolution de la mesure par PIV.

L'adoption d'un maillage plus fin n'améliore pas les résultats sur les calculs de vitesses moyennes, (les erreurs locales augmentent) ; mais permet de voir qualitativement l'évolution de l'écoulement dans les tubes.

Les écarts relatifs entre les vitesses moyennes calculées dans le réseau de tubes et les mesures restent dans une plage de $\pm 17 \%$.

Nonobstant ces remarques nous considérons que le modèle numérique représente bien le comportement physique de la maquette.

4. Conclusions.

Nous avons mis en œuvre une méthode de mesure non intrusive pour déterminer les champs de vitesse d'un écoulement d'eau à travers une structure complexe d'échangeur de chaleur. La vélocimétrie par images de particules (PIV), associée à un filtrage puis un traitement par flot optique et programmation dynamique, nous a permis de déterminer la distribution des vitesses caractéristiques dans les tubes de l'échangeur. Les mesures ont été réalisées sur une maquette à l'échelle 1 des canaux de refroidissement de l'échangeur. Ces mesures ont mis en évidence de fortes variations de débits entre les tubes ainsi que le caractère non établis de l'écoulement. L'analyse des champs instantanés confirme ce comportement.

Des simulations ont été faites sur un modèle numérique à éléments finis en trois dimensions. Les calculs menés en régime établi donnent les champs de vitesses dans le modèle pour différents débits d'entrée. Nous retrouvons dans la zone du modèle numérique, correspondant à l'espace de mesure sur la maquette, une distribution de vitesses présentant la même allure. La comparaison des vitesses caractéristiques entre les résultats des calculs et les mesures donne des écarts relatifs contenus dans une plage de $\pm 17\%$. Une comparaison qualitative des profils de vitesses montre des lois de variations semblables entre l'expérience et le calcul.

Les résultats de la confrontation entre les mesures et les calculs montrent que la modélisation numérique de cet écoulement complexe représente relativement bien le comportement spécifique du phénomène physique.

5. Remerciements.

Les auteurs souhaitent remercier les personnes suivantes qui sont intervenues à différentes étapes de cette étude :

Pour le bâti banc de test : A. Chaboche*, A. Stephen*, L. Vatrinet*, Service de Réalisations Mécanique*, V. Bourdin**, S. Rieublang**.

Pour la mire : D. Rougier*, Service de Réalisations Mécanique*.

Pour la prémaquette : J. Bissirix***, Service de Réalisations Mécanique*.

Pour la maquette : J.P. Baronick*.

Ainsi que Y. Fraigneau** pour les discussions relatives au calcul numérique.

* Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, ** Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, *** C.E.A. Saclay.

6. Références.

[1] M. Sato, Etude de l'écoulement par PIV dans un tube d'échangeur thermique, rapport de stage de Maîtrise de Technologie Mécanique, juin 2003, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 et ENS Cachan.

[2] Quénot G.M., Pakleza J., Kowalewski T.A. Particle Image Velocimetry with optical flow, *Experiments in Fluids*, 25 : 177-189, 1998.

[3] T. Faure, Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique, Rapport d'essais phases 1 et 2, janvier 2004, LIMSI-CNRS UPR 3251 ORSAY.

[4] T. Faure, Caractérisation par PIV de l'écoulement dans un échangeur thermique : mesure PIV dans chaque tube de l'échangeur, Rapport d'essais phase 3, avril 2004, LIMSI-CNRS UPR 3251 ORSAY.

[5] T. Faure, F. Lusseyran, P. Gougat et F. Launay (2004) Exploration de l'écoulement dans un échangeur de chaleur tubulaire par vélocimétrie par images de particules, 9^{ème} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, ULB, IVK, AFVL, Bruxelles (Belgique), 14-17 Septembre 2004, pp.K.4.1-K.4.8.

[6] I-DEAS, Société EDS Unigraphics Solutions France

[7] ESC, Société MAYA Heat Transfert Technologies, Montréal, Canada